

Departamento de Ingeniería Rural
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos
Universidad Politécnica de Madrid

TARIFICACIÓN, ASIGNACIÓN, RENTABILIDAD Y
AHORRO DE AGUA: PROPUESTAS PARA UN NUEVO
MARCO ECONÓMICO DEL REGADÍO

Javier Alarcón Luque
Ingeniero agrónomo

Directores:

Dr. Luis Juana Sirgado
Dr. Ingeniero agrónomo

Dr. Alberto Garrido Colmenero
Dr. Ingeniero agrónomo

Madrid, Septiembre 2014

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 201...

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:.....

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de de 201...
en la E.T.S.I./Facultad

Calificación

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis directores, Luis y Alberto, por su asesoramiento interdisciplinario, por su dedicación a esta tesis y por su apoyo, así como por haberme brindado la oportunidad de aprender con ellos durante este tiempo.

A su vez, quiero agradecer a Julio Berbel y a Azahara Mesa-Jurado, por su participación en uno de los trabajos contenidos en la tesis. Al Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, al promover la búsqueda de una serie de proyectos de modernización de regadíos, los cuales me permitieron extraer información presupuestaria luego utilizada en otro de los trabajos aquí desarrollados. Y a las confederaciones hidrográficas, las sociedades estatales de infraestructuras agrarias y las sociedades estatales de aguas, que en su día proporcionaron esos proyectos.

A su vez, deben ser reconocidas las aportaciones realizadas por los evaluadores anónimos de las revistas en las que hemos publicado algunos de los trabajos de esta tesis, y también a sus editores, por la confianza mostrada al publicarlos. Igualmente, la Asociación Española de Riegos y Drenajes (AERYD) y la Asociación Hispano-Portuguesa de Economía de los Recursos y el Medio Ambiente (AERNA), que me dieron la oportunidad de exponer dos de los trabajos en sus respectivos congresos celebrados en 2014.

Por último, quiero agradecer a María José, por su apoyo incondicional, y a Emma, quien, de alguna manera, me ayudó también a llevar mejor tan laborioso y exigente trabajo.

RESUMEN

Esta tesis propone estrategias novedosas para la toma de decisiones en aspectos relevantes del regadío, tales como el reparto y la tarificación del agua y la transformación de sistemas de riego. En primer lugar, se presenta un sistema progresivo de tarificación, que se complementa con otro de sanciones basadas en las pérdidas económicas que conlleva una reducción de las dotaciones de riego, la cual se establece como objetivo. En teoría, un sistema de tarifas diferenciadas, con el que se grave de manera discriminada el consumo por encima y por debajo de cada asignación, resulta más interesante que un sistema de tarifa única.

A continuación, se hace una propuesta de reparto óptimo de agua dentro de un colectivo de riego con diferentes unidades productivas. Se entiende por tal aquél que reporta un mayor beneficio económico para el conjunto de los regantes, dada el agua disponible. Si el colectivo no funcionara como una empresa, el beneficio marginal de la solución puede servir para orientar un mercado y/o gestionar cesiones de agua, a cambio de compensaciones. La relación entre el agua disponible y su beneficio marginal puede orientar además sobre la conveniencia de invertir en infraestructuras, acceder a nuevos recursos hídricos o, por el contrario, venderlos a otros usuarios.

La solución de reparto óptimo para una cierta situación de escasez se compara con la asignación de una misma dotación para todos los cultivos, con la reducción proporcional y con otras dos reglas más: la de igualar todas las pérdidas por hectárea y la de igualar las pérdidas relativas a los beneficios de referencia. Un estudio de caso referido a la comunidad nº V de los Riegos de Bardenas sirve para aplicar la metodología propuesta y valorar sus posibles consecuencias. Las diferencias entre una y otra regla pueden ser de gran interés, cuando las unidades productivas son heterogéneas y las restricciones de agua son importantes. La representación gráfica de beneficios relativos a cada disponibilidad de agua y orientación productiva facilitan la toma de decisiones a los gestores de riego y a los propios agricultores.

A su vez, se simula un mercado de agua en esa misma comunidad de regantes. Este mercado tiene potencial para mejorar la eficiencia de la regla proporcional, incluso cuando los costes de transacción son elevados. Y si éstos fuesen lo suficientemente bajos, se podría

obtener un resultado similar al del reparto óptimo.

Para su aplicación, los métodos propuestos se apoyan en funciones de beneficio del agua. Habida cuenta de la posible dificultad para encontrar funciones de este tipo a una escala local, se propone un método sencillo para su estimación, el cual precisa de un reducido número de datos.

En esta tesis también se estudia la viabilidad económica de la modernización de regadíos. Se plantea en primer lugar un análisis coste-beneficio de un proyecto de modernización, con el cual se valora la productividad del agua. Para ello, se analizan distintos escenarios, que se refieren al cambio o no de la orientación productiva, al ajuste o no de los riegos a las necesidades teóricas de los cultivos y al cambio o no del sistema de riego. Los resultados presentan valores significativamente diferentes para estos escenarios, si bien los datos, por incluir previsiones o expectativas, pudieran no ser suficientemente precisos.

Con el mismo fin, se propone y aplica un método general que considera las diferencias entre la situación inicial y final, en cuanto a inversiones y costes anuales, uso del agua, uso de la energía, así como beneficios de las explotaciones. El método se basa en establecer relaciones de igualdad o de sustitución entre dos variables en estudio, las cuales son función de unos ciertos valores de referencia. Estas variables pueden ser los costes de la modernización por un lado, y los beneficios de explotación o el agua ahorrada, por otro. De esta forma, para cada caso específico, los valores esperados pueden quedar claramente a un lado o al otro del punto de igualdad, lo cual indicaría si la modernización compensa o no.

Este método se ha aplicado a la transformación de riegos por gravedad en riegos localizados, manejando valores medios de costes y rendimientos de riego en España. Un primer análisis da resultados concluyentes sobre las condiciones que deberían darse para poder justificar económicamente esta actuación: rendimientos y beneficios mínimos e inversiones y consumos de energía máximos. Igualmente, con este método se pueden determinar los nuevos márgenes que se precisarían para rentabilizar modernizaciones ya realizadas, y comparar el coste de ahorrar agua con el de un recurso alternativo.

Palabras clave: escasez y restricciones de agua, eficiencia en el uso del agua de riego, tarificación, (re)asignación, reparto óptimo, mercados de agua, modernización de regadíos.

ABSTRACT

This thesis proposes and analyses several innovative elements that could support decision-making on relevant aspects of irrigation such as reallocation of endowments, water pricing and the modernization of irrigation systems. First, a progressive water pricing system is presented. This complements incentive prices including penalties based on the economic losses that an intended water restriction implies. In theory, a system of differentiated tariffs, by means of which consumption above and below each allocation is discriminately charged, is more interesting than a flat rate system.

Next, a proposal of optimal water allocation within an irrigation group with different production units is made. This is considered to be the one which permits achieving greater economic benefit for all irrigators, given the available water. If the group of farmers is not functioning as a single company, the marginal benefit of the solution can be used to guide a market and/or manage transfers of water, in exchange for compensation. Besides, the relation between the available water and its marginal benefit can inform decisions of investing in infrastructure, of accessing to new water resources or, conversely, of selling them to other users.

The solution of the optimal allocation for a given water shortage situation is compared to the ones of a uniform quota per hectare, the proportional reduction, and two more rules consisting on matching all absolute losses per hectare and matching the relative losses of income to the reference incomes per hectare. A case study based on the irrigation district of Riegos de Bardenas no. V, allows to clarify the proposed method and to value their potential consequences. The differences between one and another rule can be of great interest when production units are heterogeneous and restriction are important. The graphical representation of benefits corresponding to each water availability and production unit eases decision-making to irrigation managers and farmers.

A water market in the same community of irrigators is simulated. This market has the potential to improve the efficiency of the proportional rule, even when transaction costs are high. And if these costs were low enough, markets could reach a similar sharing to the optimal.

For application, the methods raised rely on benefit functions and water volumes used. Given the possible difficulty of finding such functions at a local level, a simple method for its estimate, which requires a small number of data is proposed.

In this thesis, the economic viability of the modernization of irrigation systems is also studied. First, a cost-benefit analysis of a modernization project is presented, with which water productivity is valued. To do this, different scenarios are analyzed, which relate to the change or not of the crop production, the adjustment or not to the theoretical irrigation needs of crops and the change or not of the irrigation system. The results show significantly different values for these scenarios, however some data, as including forecasts or expectations, may not be sufficiently accurate.

With the same purpose, a general method to study the viability of the modernization of irrigation systems is proposed and implemented. It considers the differences between the initial and final situation in terms of investment and annual costs, water use, energy use and income of farms. The method is based on establishing relationships of matching or substitution between two variables under study which are related to certain reference values. These variables can be the costs of modernization on the one hand, and the operating income or the water saved on the other. Thus, for each specific case, the expected values can clearly be to one side or the other of the equalization point, which would indicate whether or not the modernization compensates.

This method has been applied to the substitution of gravity irrigation with drip irrigation, handling mean values of costs and irrigation efficiency in Spain. A first analysis gives conclusive results on the conditions that should gather to economically justify the investment: minimum yields or operating incomes and maximum investments or energy consumption. Also, this method can determine the new margins that would be required to make profitable the modernizations already made, as well as to compare the cost of saving water with the one of alternative resources.

Key words: Shortages and water restrictions, efficient use of irrigation water, water pricing, (optimal) water allocation, water markets, modernization of irrigation systems.

ÍNDICE GENERAL

PRIMERA PARTE: Introducción, Objetivos y Métodos.....	1
1. Introducción.....	2
1.1. Recuperación de los costes de los servicios del agua.....	3
1.2. Instrumentos económicos para la gestión del agua de riego	5
1.3. La modernización de regadíos: efectos socioeconómicos y ambientales.....	7
1.4. La eficiencia en el regadío.....	12
1.5. Tarificación y asignación eficiente del agua en un regadío modernizado.....	15
2. Objetivos.....	20
3. Material y métodos	22
SEGUNDA PARTE: Resultados. Selección de trabajos realizados	25
4. Tarificación eficiente del agua de riego	28
4.1. Tarifas de riego, revisión de fundamentos y efectos en la demanda	28
4.2. Diseño de tarifas del agua de riego con sanciones al consumo excesivo.....	39
5. Asignación eficiente del agua de riego.....	51
5.1. Reparto económicamente óptimo de agua en situaciones de escasez	51
5.2. Comparación de cinco reglas de asignación diseñadas a partir de las funciones de beneficio de los cultivos	71
5.3. La regla del reparto óptimo y los mercados de agua	88
6. Eficiencia y rentabilidad de la modernización de regadíos	107
6.1. Evaluación de la eficiencia de un proyecto de modernización.....	107
6.2. Eficiencia y rentabilidad de la modernización en España: revisión y análisis para la toma de decisiones.....	125
TERCERA PARTE: Discusión, Conclusiones y Extensiones	142
7. Discusión	143
8. Conclusiones.....	146
8.1. Conclusiones generales	146
8.2. Conclusiones sobre la tarificación del agua de riego	147
8.3. Conclusiones sobre la asignación, el reparto óptimo y los mercados de agua	148
8.4. Conclusiones sobre la modernización de regadíos	149
9. Extensiones.....	152
10. Referencias	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Repartos de agua eficientes y no eficientes entre dos únicos regantes.....	14
Figura 2. Representación gráfica de las estrategias de tarificación y asignación c y d	19
Figura 3. Esquema de trabajos principales realizados en la tesis.....	27
Figura 4. Beneficio del agua de riego, en función de la tarifa aplicable.....	30
Figura 5. Pagos medios por el agua de riego en función de su consumo, en España.....	33
Figura 6. Coste del agua en Navarra, en función de las diversas dotaciones de riego.....	33
Figura 7. Asignación de agua de riego socialmente óptima.....	41
Figura 8. Asignación de tarifas y sanciones al consumo excesivo, t , en función del beneficio marginal obtenible del agua utilizada, $BM(q)$	44
Figura 9. Beneficio marginal del agua vs. Asignación, para el olivar de la subcuenca del Guadalbullón.....	48
Figura 10. Ejemplo de función cuadrática de beneficio, BR^* , pérdidas, L^* , y beneficio marginal, BM^* , relativos a los de referencia, según la asignación relativa, q^*	56
Figura 11. Función potencial de beneficio, BR^* , con exponente $e = 0.50$, y su marginal, BM^* (líneas continuas). Función cuadrática de beneficio y su marginal (líneas de puntos).....	57
Figura 12. Función de distribución, A^* , para los valores de referencia unitarios de asignación, beneficio y productividad del agua en la comunidad de regantes analizada.....	63
Figura 13. Beneficio marginal de la comunidad, BM , en función del agua disponible, Q^* , y la superficie regada, A^* , con el reparto óptimo y funciones de beneficios individuales cuadráticas.....	64
Figura 14. Beneficios y pérdidas de la comunidad, BR^* y L^* , en función del agua disponible, Q^* , con el reparto óptimo (líneas gruesas) y con el reparto proporcional (líneas finas), para funciones de beneficios individuales cuadráticas.....	64
Figura 15. Fracción de superficie regada, A^* , en relación con las dotaciones relativas, q^* , para distintas disponibilidades de agua, Q^* (0.2, 0.4, 0.5, 0.6 y 0.8), con el reparto óptimo y funciones de beneficios individuales cuadráticas.....	65

Figura 16. Beneficio marginal de la comunidad, BM , en función de la disponibilidad relativa de agua, Q^* , con el reparto óptimo y funciones de beneficios individuales potenciales.....	66
Figura 17. Beneficios y pérdidas de la comunidad, BR^* y L^* , en función del agua disponible, Q^* , con el reparto óptimo (líneas gruesas) y con el reparto proporcional (líneas finas), para funciones de beneficios individuales potenciales.....	67
Figura 18. Fracción de superficie regada, A^* , en relación con las dotaciones relativas, q^* , para distintas disponibilidades de agua, Q^* (0.2, 0.4, 0.5, 0.6 y 0.8), con el reparto óptimo y funciones de beneficios individuales potenciales.....	68
Figura 19. Pérdidas agregadas, L^* , en función de la disponibilidad de agua, Q^* , aplicando las cinco reglas a la comunidad V de Riegos de Bardenas ($R5v \equiv R5$ con variaciones en los valores de q_r y BR_r).....	82
Figura 20. Beneficio marginal, BM , relativo al agua disponible, Q^* , y fracción de superficie cultivada, A^* , aplicando el reparto óptimo a la comunidad V de Riegos de Bardenas (las líneas de trazos representan la variante $R5v$, con variaciones en q_r y BR_r)...83	83
Figura 21. Fracción de agua disponible para cada cultivo, q^* , en función de la total, Q^* , aplicando el reparto óptimo a la comunidad V de Riegos de Bardenas (las líneas de trazos representan la variante $R5v$, con variaciones en q_r y BR_r).....	83
Figura 22. . Intervalos de confianza para las pérdidas de beneficio, L^* , y el agua disponible, Q^* , según el valor marginal del agua, BM , aplicando el reparto óptimo ($R5$, $R5v$) a la comunidad V de Riegos de Bardenas	85
Figura 23. Condiciones teóricas para la transferencia de derechos al uso del agua (x) entre un comprador (1) y un vendedor (2), una vez se ha introducido una cierta restricción de agua $i \rightarrow r$	94
Figura 24. Condiciones teóricas de saturación del mercado, para las cuales la transferencia de derechos al uso del agua (x) no beneficia ni al comprador (1) ni al vendedor (2).....	95
Figura 25. Diferenciación, a partir de la función de distribución del beneficio marginal (BM), entre cultivos para los que se adquieren o se transfieren derechos de agua, tras una reducción proporcional del 7.29% en el consumo de 2011 ($Q^*=0.88$) en la comunidad V de Riegos de Bardenas.....	99

Figura 26. Asignaciones de agua, q , y beneficios del riego, BR , sin restricciones y en aplicación de la regla proporcional y un mercado sin costes de transacción en Riegos de Bardenas V, con el mismo objetivo de reducción del 25% del consumo en 2011 ($Q^*=0.71$).....	99
Figura 27. Pérdidas relativas al beneficio de referencia, L^* , según el agua disponible, Q^* , con un mercado sin costes de transacción y $C_t = 25\%$ de P_e , en Riegos de Bardenas V....	101
Figura 28. Función de distribución de la inversión en transformación de riego por gravedad en riego localizado. La línea de trazos representa su ajuste a una distribución normal.....	128
Figura 29. Funciones de densidad, f , y distribución acumulada, F , del incremento de beneficio de explotación requerido, para la transformación de riego por gravedad en riego localizado.....	134

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estrategias de tarificación y asignación del agua de riego y sus efectos.....	17
Tabla 2. Ejemplo de tarifas, t , sanciones al consumo excesivo, S , y coste del riego, T , bajo dos sistemas de tarifas progresivas, indiferenciadas y diferenciadas por bloques de consumo.....	49
Tabla 3. Escenario base en la comunidad V de Riegos de Bardenas.....	80
Tabla 4. Reparto de agua y pérdidas de beneficio, aplicando las cinco reglas a la comunidad V de Riegos de Bardenas, para una reducción del 12% del agua disponible en 2011.....	81
Tabla 5. Asignaciones medias y beneficios medios y agregados en Riegos de Bardenas V, sin restricciones de agua y ante reducciones del 7.29% y 25% del consumo de 2011 ($Q^*=0.88$ y $Q^*=0.71$), aplicando la regla proporcional y un mercado sin costes de transacción.....	100
Tabla 6. Eficiencia y ganancias del mercado, suponiendo diferentes costes de transacción, C_t , con respecto a la regla proporcional y el reparto óptimo, en Riegos de Bardenas V, ante reducciones del 7.29% y 25% del consumo de agua en 2011 ($Q^*=0.88$ y $Q^*=0.71$).....	101
Tabla 7. Costes de transacción, C_t , expresados por m^3 de agua transferida y como porcentajes del precio de equilibrio, P_e , el precio de mercado, P_m , y las ganancias del mercado, G_m , en Riegos de Bardenas V, para reducciones del 7.29% y 25% del consumo de agua en 2011 ($Q^* = 0.88$ y 0.71).....	102
Tabla 8. Estimación del cambio en la eficiencia global de transporte del agua.....	113
Tabla 9. Estimación de producción y agua requerida, ante una reorientación de cultivos en la zona regable del Genil, M.I.....	113
Tabla 10. Demanda y coste del agua, beneficios de explotación, valor presente neto y productividad del agua en la situación inicial (sin proyecto), para el regante.....	118
Tabla 11. Demanda y coste del agua, beneficios de explotación, valor presente neto y productividad del agua bajo el escenario 2C (con proyecto), para el regante.....	118

Tabla 12. Resumen de resultados y variación porcentual de valores con respecto a la situación original, previstos como consecuencia de la modernización de la zona regable del Genil, M.I., bajo los diferentes escenarios considerados.....	122
Tabla 13. Costes medios y rangos para la modernización de regadíos en España.....	128
Tabla 14. Rangos frecuentes de rendimientos en redes de distribución y reparto (R_r) y redes de aplicación (R_a), por sistema de riego. Rendimientos medios globales (R) y sus desviaciones.....	129
Tabla 15. Rendimientos iniciales, R_1 , y finales, R_2 , y ahorro unitario de agua, $R_2/R_1 - 1$, para la transformación de riego por gravedad en riego localizado. Consumos de energía e inversiones relacionadas, bajo diferentes supuestos.....	137
Tabla 16. Beneficios y costes marginales del agua ahorrada, $BM \equiv CM$, para la transformación de riego por gravedad en riego localizado, con un rendimiento final, $R_2 = 0.79$, en función de las necesidades, ET , el ahorro unitario de agua, $R_2/R_1 - 1$, y el rendimiento inicial, R_1	138

PRIMERA PARTE:

Introducción, Objetivos y Métodos

1. INTRODUCCIÓN

La conservación y la sostenibilidad de los recursos naturales constituyen un objetivo social de primer orden en el mundo moderno. La explotación de los recursos hídricos ha ido creciendo con el desarrollo económico de los países y, como consecuencia, los episodios de escasez se suceden cada vez con más frecuencia. El agua es en nuestros días uno de los recursos más importantes para el desarrollo económico. Su restricción condiciona gran parte de las actividades económicas y afecta al bienestar humano. En la agricultura el agua es un factor clave, generando el regadío cada vez más parte de la producción final y del empleo. El usuario agrario constituye, por la naturaleza de sus producciones, el mayor consumidor de agua en España, yendo al regadío cerca de un 75 por ciento del total del agua consumida (BOE, 2006), si bien en los últimos años se sigue una tendencia de ligero descenso.

Sequías como la del año hidrológico 2004-2005 pusieron al sector agrario y a buena parte de la sociedad en una situación de escasez de agua. En un contexto de escasez agravada con las desfavorables predicciones climáticas, la demanda de agua excede en cada vez más zonas regables la cantidad admisible para que su uso sea sostenible. Se justifica así el interés y la motivación por ahorrar agua en el regadío. A causa de ello y de unas mayores dificultades para conseguir nuevos recursos, en España, las políticas precedentes de expansión del regadío y de regulación del agua han dado paso a las de mejora, consolidación y modernización de regadíos, con el fin de conseguir una reducción de los consumos asociados y, complementariamente, conseguir que la incidencia agregada sobre el sector agrario sea la menor posible (BOE, 2006; Lecina *et al*, 2010b; López-Gunn *et al*, 2012).

El Plan Nacional de Regadíos concibe la gestión del agua como un proceso continuo, que recorre un largo camino desde el embalse o acuífero hasta la planta, en el cual existen múltiples oportunidades para mejorar la productividad de los recursos empleados; pero que, por su gran complejidad, exige la aplicación de métodos integradores, sin los cuales resulta imposible encontrar la combinación de actuaciones más eficaces para cada circunstancia y disponibilidades presupuestarias (BOE, 2001a). Incrementando la eficiencia en el uso del agua y potenciando medidas de ahorro y la reducción del consumo al estrictamente

necesario para cada actividad, con el Programa A.G.U.A. se pretendía un suministro de agua con el menor coste económico posible y la máxima rentabilidad, trasladando el ahorro obtenido a los beneficiarios de las actuaciones (MMA, 2003).

Cuando resulta difícil o imposible satisfacer todas las demandas, como es el caso del agua en las zonas áridas, una adecuada selección en el uso de recursos escasos puede generar ventajas competitivas importantes (Chaharbaghi y Lynch, 1999). De no limitarse los recursos empleados, además de no ser sostenible la situación en el tiempo, se imputarían al medio ambiente unos costes excesivos y a quienes no pueden disponer de aquéllos unos costes de oportunidad, también llamados costes del recurso. En consonancia con la Directiva Marco del Agua (DOUE, 2000), el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001b) establece que la planificación hidrológica tendrá por objetivos generales, entre otros, “la satisfacción de las demandas, el equilibrio y la armonización del desarrollo regional y sectorial,..., economizando su empleo y racionalizando sus usos en armonía con el medio ambiente y los demás recursos naturales”.

La asignación o el reparto de recursos hídricos tiene por objeto buscar soluciones razonables para los diferentes escenarios de oferta-demanda, aplicando metodologías diversas (Carrión *et al*, 2003; OCDE, 2009). En general, en España el sistema de reparto descansa en buena medida en el orden de prioridad de usos establecido en la Ley o en la normativa de planificación vigente, y, a un menor nivel, en los acuerdos de las comisiones de sequía y de desembalses. En las comunidades de regantes, el agua se suele repartir de manera proporcional, primando a veces los cultivos leñosos y los considerados como sociales, que demandan más mano de obra (Calatrava y Garrido, 2006).

1.1. RECUPERACIÓN DE LOS COSTES DE LOS SERVICIOS DEL AGUA

Siendo el agua un bien económico, los costes de su suministro, de su uso y su gestión, y los beneficios que del mismo perciben los usuarios deben ser considerados en la formulación de las políticas de precios del agua (Altmann, 2007). Sin embargo, en muchas zonas el precio pagado por los regantes no suele permitir recuperar ni tan siquiera los costes asociados al servicio de suministro, al menos en lo que al agua de origen superficial se

refiere, sirviendo mayormente para recuperar costes de operación y mantenimiento, y, en algunos casos, de gestión o administración (MMA, 2007). Krinner (2014) calcula una tasa media de recuperación del 72% de los costes de los servicios del agua en España, durante el periodo 2005–2011. La recuperación de costes que promueve la Directiva Marco requeriría por tanto que se cobrara más por el agua utilizada (OCDE, 2009 y 2010; Garrido y Calatrava, 2010; Fuentes, 2011). Puede ser que las dificultades administrativas y la falta de voluntad política hayan hecho que en muchos países se haya eludido el aumento de los precios del agua (Socratus, 2011).

La Directiva Marco del Agua (DOUE, 2000) exige a los estados miembros realizar análisis económicos del uso del agua, para poder aplicar el principio de recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua. Estos costes incluyen los financieros, los ambientales y los costes del recurso. Tomando como referencia a MMA (2007), y basándose en las recomendaciones técnicas de la UE (2004), los costes financieros asociados a los servicios del agua pueden ser divididos en cuatro tipos: *i*) los de inversión y amortización de las obras e instalaciones, *ii*) los de su conservación o mantenimiento y reposición, *iii*) los gastos de operación, explotación o funcionamiento, y *iv*) los gastos de administración o servicios generales. En el contexto de la Directiva Marco, los costes ambientales y los costes del recurso se pueden asimilar a los costes de evitación, prevención o reparación de daños a los ecosistemas, derivados de los usos del agua. Algunos de estos costes se derivan de la escasez de recursos, tanto para los ecosistemas hídricos como para los usos económicos (MMA, 2007).

En varios de los trabajos que integran esta tesis se plantea la recuperación de los costes financieros y los costes del recurso, entendidos estos últimos como los costes de oportunidad que a ciertos usuarios puede ocasionar el no poder disponer de una cierta cantidad de agua. Los costes ambientales, de difícil valoración, caben ser atenuados mediante un uso adecuado de los recursos hídricos, la depuración de las aguas vertidas y una acertada asignación o reparto.

1.2. INSTRUMENTOS ECONÓMICOS PARA LA GESTIÓN DEL AGUA DE RIEGO

Para alcanzar los objetivos generales que a la planificación hidrológica atribuye el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001b), el Reglamento de la Planificación Hidrológica (BOE, 2007b) contempla unos programas de medidas. Con algunas de ellas se busca una administración o gestión del agua que redunde en su uso sostenible. Se trata de instrumentos o estrategias de tipo socioeconómico, como son la asignación y el intercambio de derechos al uso del agua o la tarificación. No se contempla en estas medidas, sin embargo, la reasignación de derechos al uso del agua, en respuesta por ejemplo a situaciones de sequía; si bien están bien fijadas las prioridades en los usos y los Planes de Gestión de Sequías (BOE, 2007a) desarrollan los protocolos de actuación y las medidas a aplicar bajo estas condiciones.

La gestión del agua se ha venido haciendo tradicionalmente a través de la asignación de unos derechos de uso (Johansson *et al*, 2002; Berbel *et al*, 2007a). La predominancia de este sistema puede que radique en su transparencia y en la flexibilidad que ofrece para adaptarse a situaciones cambiantes en la disponibilidad del recurso, mediante una gestión preventiva de la escasez y por aplicación de criterios de modulación en situaciones de alerta y eventual sequía (BOJA, 2010). Así mismo, procura un trato de igualdad, en casos de suministro deficiente (Tsur y Dinar, 1995; Molle, 2009). En comparación con los sistemas de precios, la asignación de derechos goza de una mayor aceptación social y una mayor simplicidad administrativa; y son varios los autores que consideran que ofrece una mayor seguridad para ahorrar agua en el regadío: Bate (2002), Bosworth *et al* (2002), Cornish *et al* (2004) o Dinar y Maria Saleth (2005). En algunos trabajos se advierte, no obstante, que el régimen concesional debe complementarse con un adecuado sistema de pago, en función del consumo real de agua, con unos precios lo suficientemente altos como para que la demanda sea responsable (Rieu, 2005; Banco Mundial, 2006; o Molle, 2009).

En la Directiva Marco del Agua (DOUE, 2000) se insta al empleo del sistema de precios para una buena gestión de los recursos hídricos; y, entre las recomendaciones en materia de agua para España que apuntaba la OCDE en el año 2001, se incluía el establecimiento de precios que conduzcan a una utilización óptima. Con un precio del agua igual al valor para

el cual la oferta y la demanda se equilibran, se puede promover su uso sostenible (Cornish y Perry, 2003; Hellegers y Perry, 2004). La gran mayoría de los sistemas de tarificación empleados en la actualidad van acompañados de sistemas de limitación del consumo, a través de la asignación de unas dotaciones máximas (Ecologic, 2007). Dicha combinación resulta útil para reducir la demanda en función de los déficits ocasionales, cuando cae la oferta (Molle, 2009).

Un gran reto de la actual política hidrológica en Europa es la aplicación de la tarificación volumétrica en el sector agrario, especialmente en los países mediterráneos, donde la agricultura es el sector más consumidor de agua (Latinopoulos, 2008). La tarificación volumétrica por tramos o bloques de consumo promueve una reducción significativa de la demanda de agua de riego, permitiendo al mismo tiempo obtener elevados niveles de recaudación pública (Gallego-Ayala *et al*, 2011). En casos de consumo excesivo, la subida progresiva de las tarifas posibilita la recuperación del coste del recurso (ver Chohin-Kuper *et al*, 2002, y referencias en 4.2). Sin embargo, la implementación de sistemas de este tipo puede ser compleja, pues se deben considerar no sólo la estructura tarifaria, sino también el servicio de suministro, las infraestructuras de riego y los procedimientos de control de consumo (Burt, 2007). No obstante, han sido aplicados con buenos resultados en países como Francia (Jean, 1999; Montginoul y Rieu, 2001) o Canadá (Pike, 2005). En España se han hecho avances a este respecto, adoptándose estructuras tarifarias compuestas por una base fija y otra variable, relacionada con el consumo unitario (del tipo propuesto por Dono *et al*, 2012). Así, en el sistema adoptado por el Gobierno de Navarra (BON, 2003), los consumos que superan un valor de referencia son penalizados en la cifra en la que excedan el mismo, con un precio por metro cúbico no inferior al triple del valor normal.

Por otro lado, son numerosos los estudios que defienden los mercados de agua para procurar el mayor beneficio agregado, en los cuales se sugiere que son económicamente más eficientes que las opciones de no mercado, especialmente en situaciones de escasez (Arriaza *et al*, 2002; Martínez y Gómez-Limón, 2004; Calatrava y Garrido, 2006; o Pujol *et al*, 2006). Los derechos transferibles crean un sistema de incentivos económicos, en el cual aquellos usuarios que mejor conocen el valor productivo del agua pueden usar ese conocimiento para encontrar los usos más beneficiosos y maximizar por tanto el valor económico del agua. El grado en que los precios de mercado reflejen el valor del agua y fomenten su asignación eficiente dependerá del grado en que el mercado se aproxime al

paradigma competitivo (Cummings y Nercissiantz, 1992). Si fuese suficientemente competitivo, el precio reflejaría el valor marginal otorgado por vendedores y compradores, y las transacciones permitirían una reasignación continua. Sin embargo, los costes de transacción pueden impedir esa equiparación de valores marginales y restar eficiencia al mercado. Es importante por tanto evaluar las desviaciones a que esos costes pueden dar lugar, con respecto al reparto de agua más eficiente posible. Además, la aceptación de los mercados del agua puede verse limitada por el conflicto entre los objetivos de eficiencia, de equidad y sostenibilidad (Poddar *et al*, 2014). Los resultados serán distintos, según sean las condiciones de cada comunidad de usuarios, y el éxito del mercado dependerá de su adaptación a las mismas (Takahashia *et al*, 2013).

En principio, unos sistemas de tarificación y asignación bien diseñados pueden ayudar a encontrar los usos más eficientes y sostenibles del agua, en la medida en que se pueda conseguir una cierta producción con un menor consumo. Pueden disuadir al regante de incurrir en riegos excesivos, procurar un mayor beneficio al conjunto de los usuarios y, a su vez, facilitar la recuperación de los costes de los servicios del agua. Aunque la literatura sobre estos temas es abundante, nunca está de más acercar a gestores y regantes unos modelos sencillos que permitan repartir de manera eficiente el agua, con objeto de que pudieran ser aplicados con facilidad en los colectivos de riego.

1.3. LA MODERNIZACIÓN DE REGADÍOS: EFECTOS SOCIOECONÓMICOS Y AMBIENTALES

El ahorro de agua en nuestros regadíos se ha convertido en una cuestión prioritaria. Entre los programas de medidas que se contemplan en el Reglamento de la Planificación Hidrológica (BOE, 2007b), tienen una representación importante las obras de modernización de regadíos, dirigidas a renovar sistemas de distribución obsoletos y poco eficientes en el transporte del agua, y a mejorar los sistemas de aplicación en parcela. También las actuaciones encaminadas a incorporar recursos no convencionales, como son las aguas procedentes de desalación y de depuración de aguas residuales de núcleos urbanos. Los esfuerzos en este sentido realizados desde la Administración se complementan con el interés de los propios regantes en alcanzar la máxima eficiencia hídrica, mediante

técnicas de riego que optimicen las producciones y permitan la competitividad de las explotaciones, en el marco de un sistema productivo cada vez más globalizado (BOE, 2006). Porque, aunque la modernización se haya justificado principalmente para ahorrar agua, también conlleva otros beneficios asociados, como la mejora de las condiciones de trabajo y el incremento de la productividad y la competitividad de los regadíos.

La modernización ha provocado que, en un corto periodo de tiempo, se hayan producido cambios importantes en la forma de regar de muchas zonas. Durante la pasada década, los programas de modernización han mejorado 2 Mha de regadío, habiéndose invertido en torno a 7400 M€ (MAGRAMA, 2012). Sin embargo, son pocas las evidencias y pocos los estudios que, entre otros aspectos, vinculan la eficiencia en el uso del agua con su ahorro real (Ward y Pulido-Velázquez, 2008). Entre éstos, cabe destacar los de Lecina *et al* (2010b), Cots (2011) y López-Gunn *et al* (2012), en los que se pone en entredicho el ahorro de agua de la modernización; pues, aunque hace que disminuya el volumen de agua servido en origen, puede hacer también que aumente su consumo y se reduzcan los retornos. Por otro lado, los elevados costes de inversión y de energía que exigen los riegos a presión han sido un importante lastre para algunas explotaciones con escaso margen, todavía con una representatividad importante en España. Seguramente, la presión existente por el recurso agua, junto con una inadecuada valoración de beneficios y costes, haya motivado que se hayan realizado modernizaciones que han resultado caras para la Administración o para los propios agricultores (Hardy *et al*, 2012). En este sentido, el valor productivo del agua en la agricultura y el coste del agua que previsiblemente se ahorre, podrían ser útiles para analizar la eficiencia de la modernización.

1.3.1. EFECTOS SOCIOECONÓMICOS DE LA MODERNIZACIÓN

La viabilidad de una parte importante del sector agrario viene y ha venido dada por la Política Agraria Común de la Unión Europea. Sin embargo, la progresiva liberalización de los mercados, la pretendida reducción de las ayudas directas a la producción (aunque muchos cultivos sigan dependiendo de las mismas) y las mayores restricciones medioambientales han ido generando una agricultura menos protegida y más competitiva. Esto ha provocado subidas de los precios de las materias primas agrícolas y de sus factores de producción, así como fuertes oscilaciones de precios en cortos periodos de tiempo (OCDE-FAO, 2008). Esta realidad acentúa el interés en mejorar las infraestructuras de

riego, en la medida en que éstas pueden contribuir a mejorar la estructura productiva de la agricultura, en aras de una mayor competitividad. Lograr la supervivencia de las explotaciones es el fin último por el que se ha invertido, por término medio, 9.000 € ha⁻¹ en modernización de regadíos; una cantidad que en muchos casos es cercana al valor de la tierra (Lecina *et al*, 2009). Las Administraciones Públicas han apoyado este esfuerzo: en unos casos financiando una parte de la inversión en condiciones ventajosas; en otros, subvencionándola (Calatrava y Garrido, 2010).

El aprovechamiento más eficiente del agua permite sustituir cultivos poco rentables por otros de mayor valor económico, e incluso obtener dos cosechas por año en aquellas zonas donde las temperaturas lo permitan. Esto supone un incremento en la productividad del agua: más producción o producción más rentable, con menos agua (“more crop per drop”) (Plusquellec, 2009). Esta mayor rentabilidad de las explotaciones se ve no obstante condicionada a los nuevos gastos que los regantes han de afrontar, debidos sobre todo a la inversión y, cuando se sustituyen riegos tradicionales por riegos a presión, al consumo de energía. Mientras que el uso de agua se refiere al volumen total que es suministrado, el consumo constituye la parte de ese volumen que deja de estar disponible para otros usos y usuarios. Desde el momento en que el agricultor paga por el uso del agua y tiene unas dotaciones asignadas, le interesa que la productividad basada en dicho uso sea elevada. Sin embargo, desde una perspectiva hidrológica y económica, será de mayor interés la productividad del agua consumida, al vincularse a un volumen que ya no se puede volver a usar, y que por tanto ya no puede seguir generando valor. Como argumentan Kim y Schaible (2000), los beneficios económicos del agua de riego se sobrestiman, cuando las funciones de producción de los cultivos y, con ellas, las funciones de demanda de agua de riego, se expresan en términos de agua suministrada, en vez de agua consumida que es transpirada y contribuye a fijar materia seca. El sesgo en la estimación es proporcional a la pérdida de agua a través de la lixiviación, la escorrentía y la evaporación directa.

Además de incrementar la productividad, la modernización del regadío mejora significativamente las condiciones de trabajo en el campo y permite que las explotaciones tengan una menor dependencia de la mano de obra (Playán *et al*, 2000; Dechmi *et al*, 2003;

Lecina *et al*, 2009¹). Es innegable que la modernización aporta tecnología a la labor diaria, haciendo que sea mucho más llevadera y atractiva, sobre todo para los agricultores jóvenes. Además, las modernas tecnologías de comunicaciones, concebidas para alcanzar una mayor eficiencia en el riego y facilitar el trabajo de los regantes, crean empleo de calidad, lo que supone el desarrollo de un potente sector de servicios ligado al regadío. Esto, sin duda, contribuye a consolidar el sistema agroindustrial asociado al regadío y a mejorar la calidad de vida en todas las zonas de influencia. Todo ello favorece el relevo generacional en el sector agrario y ayuda a fijar la población rural.

1.3.2. EFECTOS AMBIENTALES DE LA MODERNIZACIÓN

El efecto ambiental que más se ha esgrimido para promover la modernización de regadíos es el *ahorro de agua*. Este ahorro se debe al aumento de rendimientos o eficiencias de riego, en la medida en que este tipo de obras contribuye a reducir las pérdidas y a mejorar el control y la regulación del agua. Esa mayor disponibilidad de agua, que puede utilizarse para nuevos usos o para mantener los usos originales (entre los que se incluyen los ambientales), no ha sido convenientemente valorada. No obstante, el pretendido ahorro de agua ha quedado en entredicho cuando se ha incrementado la superficie de riego y se han introducido cultivos y rotaciones con necesidades hídricas más elevadas. En esos casos, ese aumento en los rendimientos de riego ha promovido un proceso de intensificación de la agricultura, como un “efecto rebote” o “efecto Jevons” de la modernización (ver p.e., Lecina *et al*, 2009; o Dumont *et al*, 2013). Y ello, a pesar de que el Real Decreto 287/2006, concebido para paliar los daños producidos por la sequía (BOE, 2006), advertía en su artículo 9 que el ahorro de agua conseguido mediante las obras de mejora y consolidación de regadíos, se podría utilizar para consolidar la superficie regable existente o la garantía de riego; pero que, en ningún caso, se podría aumentar la delimitación de los polígonos y superficies de riego existentes.

Ese mismo artículo 9 del Real Decreto 287/2006 añade que el ahorro producido habrá de aplicarse a la mejora de la garantía del abastecimiento a las poblaciones y a la satisfacción de las necesidades medioambientales. Sin embargo, unos aprovechamientos más eficientes

¹ El dato ofrecido por Lecina *et al* (2009) podría servir de orientación: en los antiguos sistemas de riego por gravedad del valle medio del Ebro, una persona se encargaría de regar unas 50 ha de cultivos de verano, mientras que con riego presurizado podría manejar fácilmente 200 ha.

del agua de riego han dado lugar a unos menores *retornos* o sobrantes a la salida de ciertas zonas regables, generándose con ello unos impactos ambientales aguas abajo, cuyas externalidades no han sido hasta la fecha convenientemente valoradas. Cabe recordar que la mayor parte del agua de riego que no es consumida por los cultivos genera flujos de retorno al sistema hidrológico natural. Y, además, que las redes de acequias en los regadíos tradicionales, al circular por ellas el agua durante un largo periodo del año, cuando los cauces están prácticamente secos, albergan a una valiosa vegetación hidrófila (ESTEPA, 2010). Obviando la importancia de los retornos, los sistemas tradicionales de riego por gravedad han sido desacertadamente calificados de ineficientes (Gómez-Limón *et al*, 2007). Es más, hay evidencias empíricas de que un bajo rendimiento hídrico no implica, necesariamente, un juicio negativo en cuanto a la conservación de los recursos naturales; y determinadas actuaciones de modernización encaminadas única y exclusivamente a incrementar la eficiencia de las operaciones de riego pueden suponer elevados costes, sin apenas ahorros reales de agua en el conjunto del sistema (Losada y Roldán, 2002).

Por lo tanto, la distinción entre el uso y el consumo de agua, y entre la fracción consumida y la de retorno deben tenerse muy en cuenta a la hora de valorar los beneficios y la eficiencia de los regadíos y de justificar decisiones de inversión. En el caso del regadío, la fracción de agua aplicada que es evapotranspirada por los cultivos supondría un uso consuntivo. Al contrario, los retornos de riego, es decir, la fracción que sale de las parcelas por escorrentía o percolación, son susceptibles de ser reutilizados por otros usuarios, aguas abajo. Esta posibilidad de re-uso dependerá de dos factores: la localización de la parcela en la cuenca y la calidad de los retornos. Una parcela situada junto a la costa, un lago salado o un acuífero no explotable impediría la reutilización de este agua. Lo mismo sucedería si la calidad de los retornos fuese insuficiente. No obstante, la situación es compleja y un retorno con alta concentración de sales puede ser necesario para la sostenibilidad de una zona con problemas de salinidad. De la misma manera que, para algunos cultivos, un agua con muy baja salinidad puede ser conveniente mezclarla con otra de mayor concentración de sales. En definitiva, cantidad y calidad son aspectos que convendría considerar conjuntamente y en cada caso.

Por otro lado, está bastante extendida la idea de que la modernización trae consigo una mejora en la calidad del riego, al menos en lo que se refiere al contenido final de contaminantes en las aguas de salida de la zona regable (Basso, 1994; Tedeschi *et al*, 2001;

Causapé *et al*, 2004a, 2004b; Isidoro *et al*, 2006a, 2006b). Las nuevas infraestructuras hidráulicas permiten distribuir el agua con mayor flexibilidad y aplicarla con mayor eficiencia, al igual que los fertilizantes, gracias a los sistemas de fertirriego. La disminución de excedentes de agua procedentes del riego reduce la escorrentía superficial y puede incrementar la absorción por los niveles edáficos superficiales, reduciéndose la percolación a los niveles freáticos de las aguas subterráneas. En consecuencia, se disminuye el arrastre de productos agroquímicos y de compuestos como los nitratos y los fosfatos, que pudieran contener esos sobrantes de riego, y su aporte a las masas de agua cercanas en donde acaban vertiendo, disminuyendo con ello el riesgo de eutrofización.

En definitiva, del análisis de las posibles opciones técnicas de modernización de regadíos se deberían poder extraer los efectos socioeconómicos y ambientales que justifican, en cada caso, las correspondientes inversiones. Pero, para poder medir la eficacia de cada opción, se ha de tener una referencia clara, entre otros, de los costes, la rentabilidad y el ahorro de agua que puede conllevar. Y, al mismo tiempo, se han de manejar unas relaciones adecuadas que permitan dar valor a esas variables que hacen que la modernización pueda ser justificada, desde un punto de vista económico y ambiental. Estas dos cuestiones no se han encontrado en los trabajos vistos, en los que se analizan las consecuencias económicas e hidrológicas de la modernización de algunas zonas regables, mayormente a través del empleo de indicadores de desempeño. Un conocimiento preciso de estas cuestiones resulta esencial para tomar decisiones de planificación hidrológica.

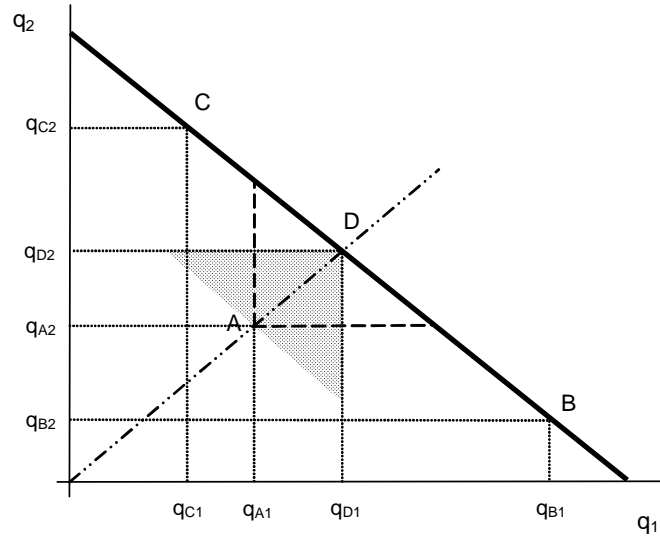
1.4. LA EFICIENCIA EN EL REGADÍO

La eficiencia económica que se puede obtener de un recurso es un criterio común que se utiliza en la gestión de recursos escasos. Un reparto eficiente es aquel que, utilizando la cantidad disponible de un recurso y las tecnologías existentes, maximiza los beneficios para la sociedad (Sampath, 1992). El concepto de *eficiencia* se cuantifica con la relación existente entre los recursos o *inputs* que se incorporan a un proceso productivo y los *outputs* generados. La eficiencia así entendida informa por tanto sobre la productividad de los recursos. Así pues, un regadío podrá ser considerado más eficiente que otro, si permite obtener un valor superior de producción, utilizando menos cantidad de algún factor productivo y no más de los restantes. Una buena gestión del regadío, por lo general,

requiere políticas dirigidas a aumentar la eficiencia en el uso del agua, puesto que "se puede lograr más con menos agua" a través de una mejor gestión (Allan, 1999).

Los óptimos de eficiencia se refieren a la no existencia de posibles mejoras en un sentido paretiano. Así, dentro de un colectivo, una reasignación de un recurso por la cual la situación de al menos un individuo mejora, sin que la de ningún otro empeore, sería una mejora de Pareto. Pensemos en una comunidad de riego con sólo dos agricultores, 1 y 2, con una misma función de beneficio privado, B , creciente con la dotación empleada y decreciente su beneficio marginal. En la figura 1 se ha representado la línea de reparto del agua disponible. El punto A no será eficiente, ya que, a pesar de representar una misma asignación para ambos agricultores ($q_{A1} = q_{A2}$), cualquiera de ellos podría obtener más beneficio sin que el otro ganase menos. Esta mejora se conseguiría yendo a cualquier punto situado en la figura 1 dentro del cuadrante que queda por encima y a la derecha de A . Ahora bien, únicamente los puntos situados sobre la bisectriz de ese cuadrante ofrecerían una misma mejora para los dos, $B_1(q_1) = B_2(q_2)$, por lo que a priori son los que representarían las soluciones equitativas. Sin embargo, ir a la situación B desde la A no sería eficiente en el sentido de Pareto, ya que menos agua se dejaría a disposición del agricultor 2, por lo que perdería beneficio: $B_2(q_{B2}) < B_2(q_{A2})$. Del mismo modo, movernos hacia el punto C desde A tampoco resultaría eficiente, siendo ahora el agricultor 1 el perdedor: $B_1(q_{C1}) < B_1(q_{A1})$.

Ante una reducción del agua disponible, aplicando el razonamiento anterior, al menos uno de los dos agricultores tendría que disminuir su consumo, y con ello perder beneficio, mientras que el otro no aumentase el suyo. Partiendo de una situación D , si el agua disponible pasara de ser $q_{D1} + q_{D2}$ a una cantidad $q_{A1} + q_{A2}$, las soluciones posibles de esta estrategia serían las representadas en la figura 1 por el área sombreada. No obstante, la reasignación más eficiente sería aquélla que minimice la suma de las pérdidas de los dos agricultores. En el caso de que los dos tengan la misma función de beneficio, con las características comentadas, esta solución es también la de mayor equidad, puesto que responde al caso en el cual se equiparan las pérdidas de beneficio de ambos regantes: el punto A sería el óptimo, si el agua disponible es $q_{A1} + q_{A2}$.

Figura 1. Repartos de agua eficientes y no eficientes entre dos únicos regantes

La solución óptima es la de “equimarginalidad”, por la cual se igualan los beneficios marginales de ambos regantes. Siendo Q el volumen total de agua disponible:

$$B = B_1(q_1) + B_2(q_2), \quad q_2 = Q - q_1$$

$$\frac{dB}{dq_1} = 0 \Rightarrow \frac{dB_1}{dq_1} + \frac{dB_2}{dq_2} \cdot \frac{dq_2}{dq_1} = 0 \Rightarrow \frac{dB_1}{dq_1} = \frac{dB_2}{dq_2} = \frac{dB}{dQ} \quad (1)$$

Este razonamiento se puede extender a la tarificación del agua de riego. Si, por ejemplo, un objetivo de reducción de dotaciones pudiera lograrse a un coste bajo, el gestor podría plantearse, para ahorrar más agua, subir su tarifa. Siempre y cuando las valoraciones sean lo suficientemente precisas, si las dotaciones se revisan a la baja cada vez que los costes marginales superan a los beneficios marginales, y viceversa, la reasignación y la tarificación conducirán a un mismo resultado, al menos si la solución óptima es única. Lo mismo podría decirse de un mercado. En definitiva, mientras se pueda lograr lo mismo o más con menos agua, habrá que disponer las oportunas infraestructuras y los oportunos instrumentos de gestión, en aras de aumentar la eficiencia en su uso (Allan, 1999).

Según la teoría económica, la eficiencia en el reparto de un recurso se logra igualando los beneficios marginales que se obtienen del mismo con el coste marginal de suministrarlo, lo cual permite maximizar el bienestar social (Dinar *et al*, 1997; Groom y Koundouri, 2011). En ausencia de elementos distorsionantes, como puede ser la falta de información, un reparto que maximiza los beneficios se llama “*first-best efficient*”. Tratándose del agua de riego, hay muchos factores que dificultan su correcta asignación (Easter *et al*, 1997;

Thobani, 1997; Spulber y Sabbaghi, 1998). Cuando el reparto se hace a partir de una información insuficiente, de unas políticas o un funcionamiento de las instituciones no del todo adecuados, se denomina “*second-best efficient*” (Tsur y Dinar, 1997).

No obstante, dado que el agua es un recurso común que a menudo se percibe como esencial, cuyo uso debe beneficiar a la sociedad en general, los criterios de eficiencia por sí solos pueden no ser suficientes para guiar las políticas de gestión (Tsur, 2005). La equidad se refiere a la justicia distributiva de las políticas públicas, por ejemplo, en el reparto de los recursos (Mathur, 1991). Así, de aplicar al agua un precio igual al coste de un recurso alternativo, podría hacer que las explotaciones menos productivas dejaran de ser rentables. En tal caso, esta política podría ser vista como “eficiente” pero no “equitativa”.

1.5. TARIFICACIÓN Y ASIGNACIÓN EFICIENTE DEL AGUA EN UN REGADÍO MODERNIZADO

La aplicación unilateral de un instrumento de gestión puede no ser tan eficiente como un enfoque combinado e integrador, en el cual se contemplen además las técnicas de riego que permitan hacer un uso más eficiente del agua (Mamitimin *et al*, 2014). En esta sección se plantea un sistema combinado de dotaciones y tarifas variables, con el cual se busca un uso eficiente del agua de riego. Se aplica, en particular, al caso en el que se implementan obras de modernización de regadíos, con el fin de analizar su viabilidad. Análogamente, podría ser aplicado a la comparación de distintas situaciones de disponibilidad de agua. Ese objetivo general de hacer un uso eficiente del agua lo vamos a supeditar a tres objetivos específicos: *i*) adaptarse en cada momento y situación a su disponibilidad y no aumentar el uso consuntivo del agua; *ii*) recuperar los costes financieros de los servicios del agua; y *iii*) no reducir la renta que venían obteniendo los regantes. Averiguaremos las dotaciones y las tarifas que permiten cumplir estas premisas u objetivos.

Podríamos diferenciar el hecho de que se mantengan los cultivos iniciales, o, por el contrario, se introduzcan cultivos más rentables, siendo esto lo más habitual en los regadíos modernizados. Sin embargo, esta distinción no tiene trascendencia, al haberse considerado que el cambio a un método de riego más eficiente permite aprovechar mejor el agua aplicada, y, con ello, aumentar los rendimientos de los cultivos. De este modo, tanto si se

mantienen o se sustituyen los cultivos iniciales, los beneficios de explotación se incrementarán tras la modernización. Otro supuesto que podría haber sido considerado es la reducción de dotaciones; pero no parece procedente, porque, según la revisión bibliográfica efectuada, en la actualidad los riegos están ya bastante ajustados a las necesidades de los cultivos, gracias en buena parte a los servicios de asesoramiento a los regantes y el acceso que éstos tienen a la información agroclimática.

Se han propuesto una serie de parámetros que, por comparación con los valores que toman en la situación de partida (1), permiten orientar sobre la conveniencia de la modernización (2), según se sigan unas ciertas estrategias de asignación y tarificación del agua de riego. Con estas estrategias, se busca cumplir los objetivos específicos previamente reseñados. Por comparación con la situación inicial, se podrían deducir las cantidades de agua que se dejarían de usar en cabecera, $A = A_2 - A_1$, los retornos que se producirían a la salida de la zona regable, $R = R_2 - R_1$, y, como suma de los anteriores, el agua que quedaría disponible: $D_2 = A_2 + R_2$. Así mismo, para las dotaciones empleadas, se podría inferir la productividad del agua, P . Conociendo ésta después de ser modernizado el regadío, ya sea para uso agrario o no agrario (uso industrial o de producción de energía), sería factible estimar el valor o beneficio potencial que se podría conseguir con el recurso ahorrado, multiplicando aquella por el volumen que se deja de consumir: $V_2 = P_2 \cdot D_2$. Si este valor final fuese inferior al beneficio inicial o de referencia que se puede conseguir del agua, la modernización conllevaría un coste de oportunidad o coste del recurso.

Las estrategias de tarificación y asignación que se plantean son las siguientes:

- a) Mantener la tarifa inicial del agua, t_1 , y la asignación inicial, q_1 . Ya sea por un mejor aprovechamiento del agua o por la sustitución de cultivos por otros más rentables, habría un cierto margen para cubrir los costes de las nuevas obras de modernización.
- b) Mantener la tarifa inicial, t_1 , y disminuir la asignación inicial, de q_1 a q_b . Los márgenes de explotación serían menores que en a , salvo que se introdujeran unos cultivos ciertamente rentables, además de con menores necesidades hídricas.
- c) Subir la tarifa del agua, de t_1 a t_c , y mantener la asignación inicial, q_1 . A no ser que se introdujesen cultivos más rentables, difícilmente podría el regante hacer frente a los nuevos costes.

- d) Subir la tarifa, de t_1 a t_d , y disminuir la asignación inicial, de q_1 a q_d . Aún sería más difícil que en b o que en c que el regante pudiera costear la modernización, salvo que se pasara a unos cultivos bastante más rentables y con menores necesidades hídricas.
- e) Subir la tarifa, de t_1 a t_e , y aumentar la asignación inicial, de q_1 a q_e , siempre y cuando el volumen suministrado en cabecera se redujera (de Q_1 a Q_e). Una mayor dotación daría al regante más juego para poder costear las obras de modernización.

Como puede verse, el éxito de estas estrategias pasa en gran medida por introducir unos cultivos más rentables, tal y como se ha hecho, por ejemplo, en muchas zonas de Andalucía con los cítricos. Obsérvese que no se ha tenido en cuenta la posibilidad de rebajar la tarifa de riego, puesto que en ese caso los costes de la modernización no podrían ser recuperados, salvo que fuesen muy bajos. Ni tampoco la remota opción de aumentar los precios de venta de la producción, en la cuantía necesaria para compensar el coste de las obras, en cuyo caso se trasladaría este coste al consumidor final. En la siguiente tabla 1 se muestran, por comparación con la situación de partida y mediante los parámetros presentados, los efectos de estas cinco estrategias.

Tabla 1. Estrategias de tarificación y asignación del agua de riego y sus efectos

	t (€ m ⁻³)	q (m ³ ha ⁻¹)	Q (m ³ ha ⁻¹)	A (m ³ ha ⁻¹)	R (m ³ ha ⁻¹)	D (m ³ ha ⁻¹)	P (€ m ⁻³)	V (€ ha ⁻¹)
<i>Sin modernización (1)</i>	t_1	q_1	Q_1	-	$R_1 = Q_1 - q_1$	$D_1 = R_1$	P_1	$V_1 = P_1 \cdot D_1$
<i>Con modernización (2)</i>								
Estrategia a	t_1	q_1	$Q_a < Q_1$	$Q_1 - Q_a$	$R_a = Q_a - q_1 < R_1$	$D_a = Q_1 - q_1 = D_1$	$P_a > P_1$	$V_a = P_a \cdot D_1 > V_1$
Estrategia b	t_1	$q_b < q_1$	$Q_b < Q_1$	$Q_1 - Q_b$	$R_b = Q_b - q_b$	$D_b = Q_1 - q_b > D_1$	$P_b > P_1$	$V_b = P_b \cdot D_b > V_1$
Estrategia c	$t_c > t_1$	q_1	$Q_c < Q_1$	$Q_1 - Q_c$	$R_c = Q_c - q_1 < R_1$	$D_c = Q_1 - q_1 = D_1$	$P_c > P_1$	$V_c = P_c \cdot D_1 > V_1$
Estrategia d	$t_d > t_1$	$q_d < q_1$	$Q_d < Q_1$	$Q_1 - Q_d$	$R_d = Q_d - q_d$	$D_d = Q_1 - q_d > D_1$	$P_d > P_1$	$V_d = P_d \cdot D_d > V_1$
Estrategia e	$t_e > t_1$	$q_e > q_1$	$Q_e < Q_1$	$Q_1 - Q_e$	$R_e = Q_e - q_e < R_1$	$D_d = Q_1 - q_e < D_1$	P_e	$V_e = P_e \cdot D_1$

t : tarifa del agua de riego

q : asignación de agua que es consumida en parcela

Q : agua que es suministrada en cabecera de la red

A : agua que se deja de utilizar en cabecera

R : retornos de agua al medio

D : agua que queda disponible, no consumida ($A + R$)

P : productividad del agua

V : valor o beneficio potencial para uso agrario del agua que queda disponible

Nota: t y q habrían de ser calculados de manera que fuese contrarrestada la pérdida de beneficio que ocasionan al regante

los costes de la modernización, de forma que se mantenga el beneficio inicial, $B_1 = \int_0^{q_1} BM_1 \cdot dq - \int_0^{q_1} t_1 \cdot dq$

En la tabla 1 puede apreciarse que la cantidad de agua que deja de ser consumida y que queda por tanto a disposición, D , suma de la que se deja de extraer y la de retorno, aumenta o se mantiene igual a la inicial, salvo con la estrategia e , con la cual disminuiría. Todas las estrategias menos ésta darían lugar a una productividad, P , mayor a la inicial. Con las estrategias a y b difícilmente se podrían recuperar los costes de la modernización, habida cuenta que se mantienen las tarifas iniciales, pero sí con las c , d y e , en que se suben las tarifas de riego.

Consideremos ahora el beneficio de explotación bruto, B , en € ha⁻¹, que obtendría un regante si no tuviera que pagar por el agua que usa, gravada a una tarifa t . Para que no tenga pérdidas de beneficio, B , al pasar de una situación inicial, 1, a otra final, 2, tendremos:

$$B_2 - B_1 \geq 0 \rightarrow \int_0^{q_1} BM_1 \cdot dq - \int_0^{q_1} t_1 \cdot dq \leq \int_0^{q_2} BM_2 \cdot dq - \int_0^{q_2} t_2 \cdot dq \quad (2)$$

Así pues, manejando diversas tarifas y dotaciones, según los casos, a partir de (2) podremos calcular el beneficio mínimo, en € ha⁻¹, que en la situación final debería obtener cada regante, para que le siguiera siendo rentable su actividad:

$$B_2 - B_1 = \left(\int_0^{q_2} BM_2 \cdot dq - \int_0^{q_2} t_2 \cdot dq \right) - \left(\int_0^{q_1} BM_1 \cdot dq - \int_0^{q_1} t_1 \cdot dq \right) = 0 \rightarrow B_2 \text{ mín} \quad (3)$$

Según esto y a partir de la expresión (2), se formulan a continuación las condiciones matemáticas específicas, con las cuales calcular las correspondientes tarifas y asignaciones para las cuatro estrategias con las que no se reduce la disponibilidad de agua.

$$\text{Estrategia } a \ (t_a = t_1; q_a = q_1): \int_0^{q_1} BM_a \cdot dq \geq \int_0^{q_1} BM_1 \cdot dq \quad (4)$$

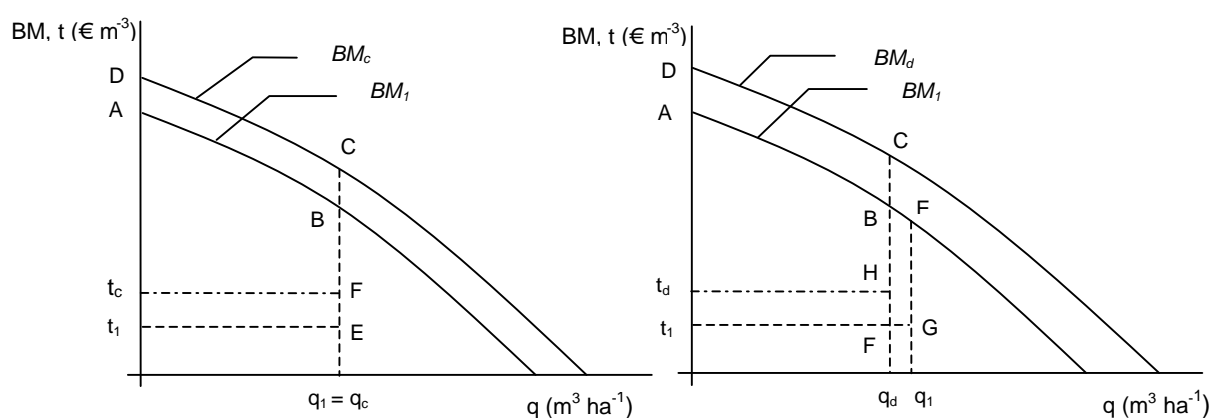
$$\text{Estrategia } b \ (t_b = t_1; q_b < q_1): \int_0^{q_b} BM_b \cdot dq + t_1(q_1 - q_b) \geq \int_0^{q_1} BM_1 \cdot dq \quad (5)$$

$$\text{Estrategia } c \ (t_c > t_1; q_c = q_1): \int_0^{q_1} BM_c \cdot dq + q_1 \cdot (t_1 - t_c) \geq \int_0^{q_1} BM_1 \cdot dq \quad (6)$$

$$\text{Estrategia } d \ (t_d > t_1; q_d < q_1): \int_0^{q_d} BM_d \cdot dq - t_d \cdot q_d + t_1 \cdot q_1 \geq \int_0^{q_1} BM_1 \cdot dq \quad (7)$$

Las estrategias *c* y *d*, en principio más favorables, se han representado gráficamente en la siguiente figura 2 (la *c* a la izquierda y la *d* a la derecha). En ambas, el incremento del beneficio de explotación bruto (sin incluir el pago de la tarifa del agua), que repercute la modernización, ha de compensar la subida de la tarifa. Este incremento de beneficio se representa, para la estrategia *c*, mediante el área $ABCD$; y para la *d*, con el área $ABCD - q_1EBq_d$. Por su parte, el coste o pago de la tarifa de riego queda representado con el área t_1EFt_c , para la estrategia *c*; y con $t_1FHT_d - q_1GFq_d$, para la *d*. Como puede observarse, la estrategia *c* es un caso particular de la *d*.

Figura 2. Representación gráfica de las estrategias *c* (izquierda) y *d* (derecha)



Como consecuencia, podemos decir que una tarificación y un reparto bien diseñados facilitarán la recuperación de los costes del agua en su correcta medida, cuestión trascendente en zonas regables modernizadas. Del análisis realizado, se ha visto que, para no reducir la renta del regante, no aumentar el uso consuntivo y recuperar los costes financieros de los servicios del agua, es casi obligado introducir unos cultivos de mayor rentabilidad. Gracias a ese posible incremento en los márgenes de explotación, resultaría más factible obtener valores de productividad superiores a los iniciales. Sólo entonces aumentarían los volúmenes finalmente disponibles, como suma del agua que se deja de utilizar en cabecera y los retornos. Entre estas combinaciones o estrategias, la de subir la tarifa de riego y rebajar las dotaciones es la más favorable para cumplir los objetivos planteados, si bien exige un considerable incremento en los beneficios de explotación.

2. OBJETIVOS

Dentro del objetivo general de mejora de la gestión del agua de riego en un contexto de escasez y en un regadío modernizado, en esta tesis se pretende proporcionar unos criterios metodológicos que podrían ayudar a conseguir un uso sostenible y eficiente de los recursos hídricos. Estos criterios serían de utilidad para asignar de manera eficiente los volúmenes disponibles para riego, en respuesta a las fluctuaciones en las reservas hídricas. También servirían para disuadir a los regantes de incurrir en consumos excesivos de agua, de manera que no ocasionen costes de oportunidad a otros usuarios. Y, a su vez, para evaluar posibles actuaciones de mejora o modernización de las infraestructuras y los sistemas de riego.

Por un lado, se estudia la tarificación y la asignación del agua de riego y se proponen y formulan ciertos sistemas de tarifas y ciertas reglas de reparto. Se comparan estos instrumentos, testando su eficiencia económica, medida con el criterio de conseguir el mayor beneficio agregado posible de los recursos hídricos disponibles en un colectivo de riego. Buscando esta eficiencia, los correspondientes métodos irán destinados a orientar a los gestores en la determinación de tarifas y asignaciones de agua; y a las comunidades de regantes y a los agricultores en la elección de cultivos. Por otro lado, se plantean unas relaciones de equilibrio y eficiencia económica, que pueden ser útiles para orientar o ayudar en la toma de decisiones de inversión en modernización de regadíos. Mediante el empleo de unas expresiones analíticas y gráficas relativamente sencillas y asequibles, se intenta acercar los métodos propuestos a los gestores del agua y a los propios agricultores.

Más concretamente, la tesis se plantea con la finalidad de lograr los siguientes objetivos específicos:

1. Formular un modelo disuasorio de consumos excesivos del agua de riego, con el cual se podría llegar a internalizar los costes del recurso.
2. Formular el reparto económicamente óptimo del agua en un regadío con diversidad productiva y en condiciones de escasez.

3. Comparar la eficiencia económica de diversas reglas de asignación en una zona regable, incluyendo el reparto óptimo y un mercado interno de agua, sujeto a diversos costes de transacción.
4. Analizar los costes y los beneficios económicos privados de la modernización, así como su posible beneficio social en cuanto al ahorro de agua que se podría alcanzar con la misma.
5. Analizar y valorar las condiciones que justificarían la modernización de regadíos, atendiendo a sus costes, la demanda de energía, los beneficios de explotación y el ahorro de agua que puede conllevar.
6. Estimar el beneficio marginal o valor productivo del agua en la agricultura, con objeto de analizar la eficiencia económica de los instrumentos considerados y valorar recursos alternativos.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

En esta tesis se propone un modelo de tarificación volumétrica progresiva para el agua de riego, que se basa en el coste de oportunidad o del recurso que resulta de limitar su uso (capítulo 4.2). Dicho valor sirve para determinar sanciones eficientes a todo consumo excesivo, una vez se hayan fijado unas dotaciones objetivo por cultivo, según el agua disponible. Esa pérdida de beneficio que resulta de una cierta restricción de agua se puede calcular por integración de las correspondientes funciones de beneficio marginal del agua para cada cultivo y zona. Además de estas funciones, para poder aplicar correctamente este método, se exige la instalación de un adecuado equipamiento que permita el control de los volúmenes utilizados por los usuarios individuales.

A continuación, con el objeto de analizar el reparto en condiciones de escasez o restricción, se estudian cinco reglas de asignación del agua de riego. Como principal criterio de comparación de estas reglas, se utiliza la eficiencia económica agregada. La misma se mide como la suma de los beneficios netos de explotación individuales que se obtendrían en una comunidad de regantes, en función del volumen de agua que pueda preverse disponible para una campaña de riego, dados unos medios de explotación y considerando invariables aspectos estructurales, como la propiedad de la tierra, el clima o la fertilidad del suelo.

Para cada regla se presenta su formulación analítica, mediante la cual obtener la asignación y beneficio correspondientes a cada cultivo en una zona regable, ante una cierta disponibilidad de agua. Ésta se expresa como una variable adimensional, al relacionarla con la dotación de referencia, con la cual las necesidades de agua de la zona se verían completamente satisfechas. Para esas formulaciones se consideran unas restricciones generales y las restricciones específicas que son propias de cada regla. En el caso del reparto óptimo, se plantea y resuelve el problema de maximización del beneficio agregado, mediante programación no lineal. El problema se ha resuelto para funciones de beneficio individuales dadas por polinomios de segundo grado y/o por relaciones potenciales.

La maximización del beneficio agregado se aplica también para simular un mercado intrasectorial de agua, interno a una misma comunidad de riego. Se añade en la función objetivo el cobro o el pago por el agua transferida, incluyendo en el mismo diferentes

costes de transacción. Según sean éstos, se estiman las pérdidas de beneficio que resultarían con respecto a la regla proporcional y el reparto óptimo, el cual equivaldría a un mercado con costes de transacción nulos. Los costes de transacción son el elemento de análisis, para ver hasta qué punto el mercado permitiría lograr un reparto óptimo del agua y, con ello, la máxima eficiencia económica. Al igual que los dos estudios de las reglas de reparto (5.1 y 5.2), este del mercado (5.3) se ha aplicado en la comunidad V de los Riegos de Bardenas.

Con objeto de simplificar los modelos matemáticos, visualizar los resultados individuales y del conjunto y comparar mejor las reglas entre sí, se han usado variables adimensionales, tomando como variables de referencia las correspondientes a la situación sin restricciones de agua. Las representaciones gráficas de las reglas facilitan así mismo su comparación y aportan información útil sobre asignaciones individuales y superficie regada, en función de las previsiones de agua que se tengan para una campaña de riegos. Para simplificar los cálculos, se asume que los modelos se aplican a las asignaciones de agua, pero no a la superficie destinada a los diversos cultivos, si bien, en situaciones de restricción severa, ciertos cultivos podrían verse privados del riego.

En un tercer bloque de esta tesis se estudia la modernización de regadíos, desde un punto de vista económico. Se ha aplicado primero un análisis coste-beneficio a un proyecto concreto de modernización localizado en la Z.R. del Genil M.I. Para ello, se han barajado diversos escenarios de acompañamiento al mismo, los cuales pueden condicionar la viabilidad económica de aquél: el posible cambio en la orientación productiva, la probable sustitución del sistema de aplicación de riego y el ajuste de los riegos a las necesidades de los cultivos. Se analizan diversos indicadores de desempeño que resultan para esas situaciones, tales como el valor presente neto y la relación coste-eficacia de la inversión, la productividad y el ahorro de agua, y se comparan con los previstos para la situación inicial sin proyecto.

A continuación, se hace un análisis de rendimientos de riego, de costes y beneficios de la modernización de regadíos. El mismo ha sido posible gracias a la consulta y análisis previos de numerosos presupuestos de obra y de una amplia revisión bibliográfica. Para esos parámetros se obtienen unos valores medios de referencia y unos rangos de valor para España, valores que se han normalizado, con el fin de aproximar su representatividad a un amplio rango de situaciones o contextos.

Seguidamente, se plantea un método general para analizar la viabilidad económica de una modernización. Utilizando esos valores de referencia aludidos, se establecen relaciones de igualdad entre los costes y los beneficios de la modernización. Estableciendo grados de libertad para esos datos, se obtienen valores máximos de inversión o consumo de energía, así como valores mínimos de beneficios de explotación y ahorro de agua, que harían que una modernización fuese rentable. Equiparando costes y beneficios, este método permite mostrar a su vez qué rendimientos de riego justificarían una cierta transformación. Así mismo, permite definir las condiciones (demanda y rendimientos de riego) para las cuales sería económicamente más eficiente acudir a un recurso alternativo que ahorrar agua a través de la modernización.

Todos estos métodos tienen en común que requieren, para ser aplicados, conocer las funciones de beneficio en respuesta al agua aplicada a todos los cultivos que se den en la zona o comunidad objetivo de que se trate. A sabiendas de que esto puede limitar su aplicabilidad, se presenta un método sencillo para determinar este tipo de funciones, cuando se dispone de un reducido número de datos. Estos datos son las dotaciones con las cuales se satisfacen las necesidades hídricas de los cultivos y los beneficios que se obtienen aplicando esas dotaciones, que serán los máximos. Conociendo así mismo los beneficios en seco, la condición de máximo permite obtener las correspondientes funciones de beneficio del agua. Se proponen funciones de beneficio de tipo cuadrático y potencial, las cuales han mostrado tener particularidades distintas y complementarias. Valores orientativos para esos tres datos necesarios pueden ser extraídos de las estadísticas agrarias, si bien es preferible recabar información más específica a nivel local y de las propias comunidades de regantes, como se ha hecho con la comunidad V de los Riegos de Bardenas (sección 5). Existiendo una mayor o menor incertidumbre en estos datos, en uno de los trabajos (5.2) se llevan a cabo algunos análisis de variación y sensibilidad de los mismos.

SEGUNDA PARTE:

Resultados. Selección de trabajos realizados

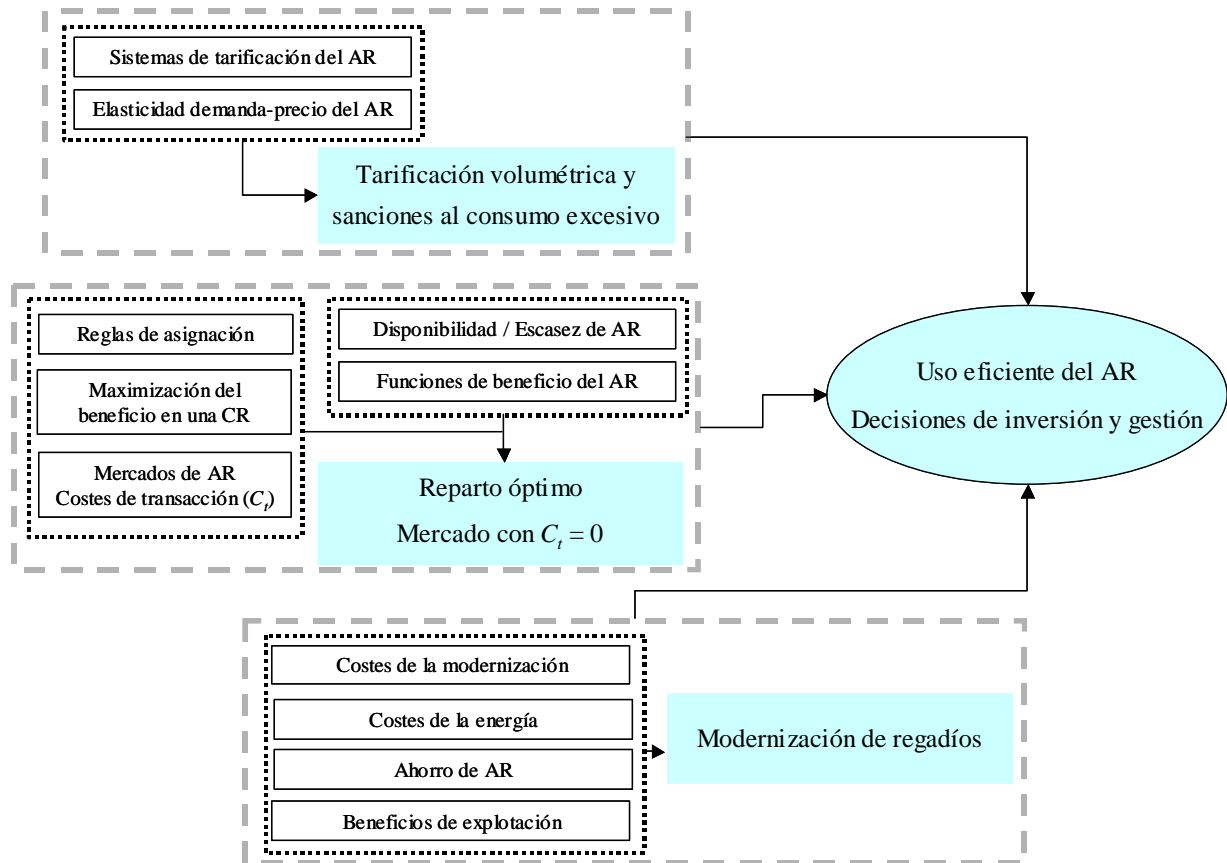
La segunda parte de esta tesis contiene tres capítulos. En ellos se abordan de un modo específico y práctico los instrumentos de tarificación, asignación e intercambio del agua de riego, buscando la máxima eficiencia en su uso, dentro de un regadío. Contienen seis artículos de investigación, dos por epígrafe. Cuatro de estos artículos han sido publicados y otros dos han sido presentados en sendos congresos. En la sección 4 se hace una revisión bibliográfica de los fundamentos de las tarifas de riego y sus efectos en la demanda de agua, poniéndose de relieve la existencia de una respuesta bastante inelástica de la demanda al precio de este recurso. Seguidamente, se proponen dos métodos de tarificación volumétrica, con los cuales internalizar el coste del recurso, introduciendo para ello sanciones al consumo excesivo, calculadas a partir del lucro cesante que se deriva de una menor asignación.

En la sección 5 se formulan diferentes reglas de asignación del agua de riego, entre las que destaca el reparto óptimo, con el cual distribuir los recursos disponibles de la manera más eficiente, desde un punto de vista económico. Esta eficiencia se compara con la de la regla proporcional y las de otras tres reglas de reparto, así como con la de un mercado intra-sectorial del agua de riego. Partiendo de una asignación inicial subóptima, se analiza la mejora de la eficiencia económica que se podría alcanzar con la aplicación de un mercado, en atención a los posibles costes de transacción asociados. Tres estudios de caso permiten ilustrar los métodos y comparar los resultados previsibles en una comunidad de regantes. En ellos, se propone un método simple para determinar funciones de beneficio del agua, imprescindible para poder aplicar el reparto óptimo.

Por último, en la sección 6 se desarrolla un método de análisis comparativo de la eficiencia y rentabilidad de los regadíos modernizados y los regadíos sin modernizar, el cual puede resultar de utilidad para la toma de decisiones de inversión. Tomando unos valores medios de costes y rendimientos de riego, que han sido extraídos de una amplia compilación de datos, y que podrían servir de referencia en España, se estudia el efecto hidrológico y económico de la transformación de riegos por gravedad en riegos localizados. En particular, los márgenes de explotación y el valor productivo del agua que serían necesarios para rentabilizar las inversiones y la mayor demanda de energía, así como el coste que supone el previsible ahorro de agua. Indicadores económicos de este tipo, además de ese previsible ahorro de agua, se estiman a su vez para un proyecto concreto de modernización, planteando diversos escenarios, con objeto de matizar su viabilidad económica.

En el siguiente esquema se integran todos los contenidos de esta segunda parte de la tesis, los cuales representan las contribuciones principales de la misma. El fin último que está presente en todos ellos es el de lograr una buena gestión y uso del agua de riego, en un contexto de escasez y en un regadío modernizado, proporcionando unos métodos y unos criterios para asignar de manera eficiente los volúmenes disponibles, así como para orientar sobre qué decisiones de inversión podrían estar justificadas para ahorrar agua.

Figura 3. Esquema de trabajos principales realizados en la tesis



AR: agua de riego; CR: comunidad de regantes

4. TARIFICACIÓN EFICIENTE DEL AGUA DE RIEGO

4.1. TARIFAS DE RIEGO, REVISIÓN DE FUNDAMENTOS Y EFECTOS EN LA DEMANDA

Artículo de revisión: “Tarifas de riego, revisión de fundamentos y efectos en la demanda”.
Riegos y drenajes XXI nº 185, Marzo 2012, 31-39.

Autor: Javier Alarcón.

4.1.1. Costes, precios y tarifas del agua de riego: algunas consideraciones

Entre las recomendaciones en materia de agua para España que apuntaba la OCDE en el año 2001, se incluía la necesidad de desarrollar políticas centradas en la gestión de la demanda, entre las que destaca el establecimiento de precios que conduzcan a una utilización óptima del recurso. La Directiva Marco del Agua (DOUE, 2000) estableció por su parte la conveniencia de utilizar el instrumento económico de la tarificación, para la consecución de los objetivos ambientales y de eficiencia en el uso de los recursos hídricos. El principio de *recuperación de costes* de los servicios relacionados con el agua, que introduce en su artículo 9, fue incorporado al texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001b).

Siendo el agua un bien económico, los costes de su suministro, uso y gestión y los beneficios que del mismo se perciben deben ser considerados en la formulación de las políticas de precios del agua. La Directiva Marco define en su artículo 2 los servicios del agua, como “aquellos proporcionados a los usuarios para el desarrollo de cualquier actividad económica”. Estos servicios tienen tres categorías de costes: *i*) los *costes financieros* son los relacionados con los servicios del agua, e incluyen los costes de prestación y administración de estos servicios, los costes operativos y de mantenimiento, los costes de capital, etc.; *ii*) los *costes ambientales* son los que resultan del impacto negativo que el uso de los recursos hídricos puede tener sobre el medio ambiente; *iii*) los *costes del recurso* representan el coste de oportunidad asociado a las pérdidas de los usuarios por no poder utilizar el recurso. Este coste de oportunidad surge de una asignación ineficiente del recurso, cuando hay competencia por el mismo y cuando hay usos alternativos que generan un valor económico o ambiental mayor que el uso presente o previsto. La eficiencia en la gestión exige que se conozcan e incorporen los costes de oportunidad del recurso en las decisiones (MMA, 2007).

En la práctica, son varias las fuentes que apuntan a que las tasas que se cobran por los servicios del agua se sitúan bastante por debajo de sus costes financieros, sirviendo mayormente para recuperar costes de operación y mantenimiento, y, en algunos casos, de gestión o administración. De este modo, las tarifas por uso del agua son claramente inferiores a su valor marginal (Molle, 2009). De acuerdo con MMA (2007), el nivel medio de recuperación de los costes de los servicios de agua en España fue del 87% para el año 2002. Berbel *et al* (2007b) subrayan las diferencias que pueden darse en estas cifras, dependiendo de los gastos que sean computados en su cálculo. Así, si se atiende al criterio de la Ley de Aguas para definir la tarifa del agua, según el cual se suman los costes de operación y mantenimiento y los de amortización de las infraestructuras, sin intereses, la recuperación de estos costes financieros alcanzaría el 99%, pero si se considera una depreciación más rápida y un 5% de tasa de interés, la recuperación se reduce a un 71%, o incluso menos si hay que introducir gastos de reposición.

Es frecuente achacar el uso abusivo del agua a unos precios bajos, indirectamente subsidiados, insuficientes para sufragar los costes necesarios para poder ponerla en servicio². Podemos hablar entonces de una ineficiencia en la asignación de precios, debida a que, para los bienes comunales, como el agua, no existen mercados reales donde la oferta y la demanda se equilibren a través de los precios y la competencia, tal y como sucede con los bienes privados (Olona y Horta, 2010). En realidad, no cabe hablar de precios verdaderos del agua, sino más bien de tasas públicas determinadas por derechos administrativos, con las que se grava el consumo. Y ello, porque un precio se intercambia en un mercado, mientras que una tasa se establece por una institución que presta un servicio³.

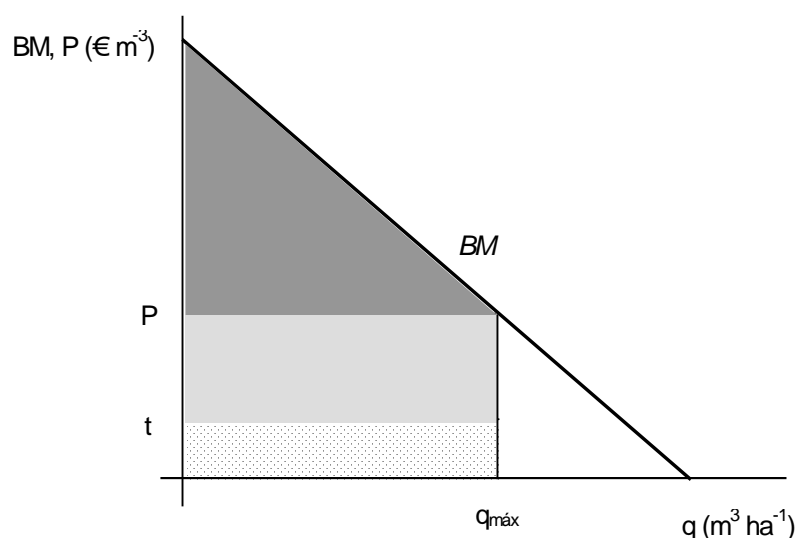
Este desajuste entre costes y precios del agua se puede apreciar en la siguiente figura 4, en la que se representa una función de valor marginal del agua. Para una cierta cantidad o asignación máxima, q_{max} , el precio que podría considerarse eficiente, P , sería aquél que coincidiese con el beneficio marginal atribuible a esa cantidad. El valor del recurso para el regante medio, como renta económica que le queda tras pagar el precio (excedente del consumidor), se podría entonces medir por el área más sombreada. A su vez, un precio P superior a aquél que permite recuperar la totalidad de los costes de los servicios del agua, t , permite proporcionar una renta a

² De acuerdo con MMA (2007), la subvención implícita del agua para abastecimiento en los municipios españoles oscila entre el 20% y el 40% del precio final. En los usos agrarios puede estar entre el 10% y el 50%.

³ La literatura habla de "precios administrados", refiriéndose más bien a tasas, tarifas, cánones o exacciones que han de sufragarse para poder ejercer el derecho de uso del agua (Garrido *et al*, 2004).

la Administración recaudadora (área gris claro), la cual podría ser destinada a la conservación del recurso. Por el contrario, si la recaudación que se obtiene es inferior al gasto en servicios del agua (área punteada), la tarifa que se estuviera aplicando (inferior a t) sería claramente ineficiente, en cuyo caso resultaría inviable recuperar todos los costes del servicio.

Figura 4. Beneficio del agua de riego, en función de la tarifa aplicable



Fuente: Elaboración propia, a partir de Berbel (2010).

El cálculo de cualquier tipo de tarifa de riego se reduce, en teoría, a un reparto de los gastos a incluir en ella entre los diversos usuarios, ya sea a través de la superficie regada, el caudal concedido o el utilizado, o cualquier otra unidad de medida que refleje el uso del agua. En España, de manera simplificada, el coste final de los servicios del agua es la suma de los gastos de funcionamiento de las infraestructuras e instalaciones, de los gastos de su amortización y de los gastos de gestión o administración. El cobro por los servicios del agua de riego se efectúa básicamente a través de tres instrumentos de recaudación: el *canon de regulación* se destina a sufragar los servicios de captación y embalse de aguas superficiales; la *tarifa de utilización de agua* se concibe para costear los servicios de transporte de aguas superficiales distintos a los de regulación; y las *tarifas y derramas de los colectivos de riego* sirven para cubrir los costes de distribución del agua, incluyendo, en su caso, la extracción de aguas subterráneas (MMA, 2007).

Son varios los expertos que coinciden en que una de las causas fundamentales que explican la mala conservación y el retraso tecnológico de los sistemas de riego ha sido la tradicional forma de tarificación del agua, caracterizada por unos pagos muy moderados y por superficie regada. En MMA (2007) se dice que la fijación de la hectárea como unidad de pago,

independientemente del volumen de agua suministrado, no produce incentivo para la reducción de consumos y el uso eficiente. En estas circunstancias, el agua puede representar un coste fijo pequeño (con un coste marginal nulo), sin que existan estímulos económicos para un uso más racional o para una buena conservación de las infraestructuras de riego. Todo ello ha llevado a que las inversiones en tecnologías ahorradoras de agua sean vistas a menudo por los regantes como un gasto más, que no les reporta un ahorro significativo (Riesgo y Gómez-Limón, 2002).

Sin embargo, en comunidades de regantes en las que se han adoptado sistemas de tarificación binómica, y en general en las que hay elementos de control volumétrico, los precios pueden resultar más eficientes para recuperar los costes del agua, que en otras en las que se repercuten tarifas planas (García Mollá, 2002; Cornish y Perry, 2003; Hellegers y Perry, 2004). Además, las tarifas volumétricas puras, evitando los términos fijos, así como la tarificación discriminatoria por cultivos, fomentan en principio la introducción de especies con menores exigencias hídricas. La utilización de una parte fija puede resultar adecuada, no obstante, cuando se trata de recuperar inversiones en infraestructura.

Por su parte, la tarificación por tramos o bloques de consumo promueve una reducción significativa de la demanda de agua de riego, con las menores reducciones en la sostenibilidad de las explotaciones, permitiendo al mismo tiempo obtener elevados niveles de recaudación pública (Gallego-Ayala *et al*, 2011). Lo que es más, los sistemas de tarifas progresivas y penalizaciones que gravan los riegos en exceso se han demostrado un eficaz complemento a las cuotas, para minimizar el coste de escasez del recurso y optimizar la recaudación por la administración gestora (Chohin-Kuper *et al*, 2002).

Cabe hablar de importantes diferencias en el importe medio de los pagos en las diferentes comarcas agrarias españolas; hasta de casi cuatro veces, conforme a MMA (2007). Estas diferencias vienen dadas, entre otras razones, por la procedencia de los recursos y su coste de obtención, las inversiones realizadas, la calidad de los servicios prestados, los sistemas de aplicación de riego, la organización de los regantes y las estimaciones y los cálculos empleados. Según esta fuente, el importe promedio muestreado de los pagos a los colectivos de riego que usan sólo aguas de origen superficial era de unos $0,02 \text{ € m}^3$ (112 € hā^1), bastante menos que el pago medio por el uso de aguas subterráneas, en torno a los $0,10 \text{ € m}^3$ (705 € hā^1). Algo más elevado resulta el coste del agua superficial, si consideramos el dato que ofrecen

Berbel *et al* (2007b): entre 0,04 y 0,07 € m³ ⁴. Y aún mayor en algunas zonas regables de Andalucía analizadas por Rodríguez Díaz *et al* (2011), todas con riego presurizado y representativas de una amplia variedad de cultivos locales: de 0,04 a 0,18 € m³, con un valor medio de 0,10 € m³. En este estudio, los costes totales medios de explotación y mantenimiento ascienden a 235 euros por ha y año, mientras que en MMA (2007) se estima un pago medio ponderado de 263 euros por ha y año.

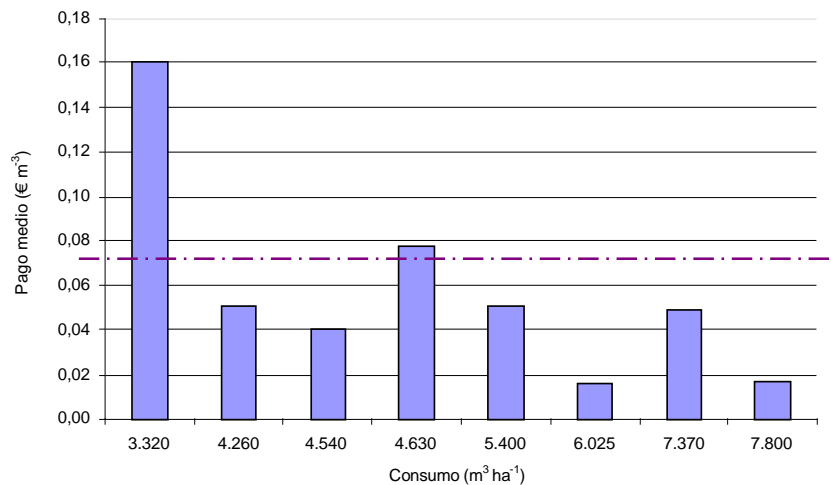
4.1.2. La demanda de agua de riego en función de su precio: algunos datos

La demanda de agua de riego ha sido estudiada por muchos investigadores, en muchas zonas. Hay a su vez trabajos en los que se analiza el efecto de los precios del agua en la agricultura bajo distintos escenarios políticos, como el del Plan Especial del Alto Guadiana (2003). Estos estudios, mayormente locales, ponen de manifiesto que la respuesta de los agricultores es desigual, dependiendo en gran medida de la rentabilidad de los cultivos, de las necesidades hídricas y de la contribución que tiene el agua en la renta que generan (valor residual), así como de la eficiencia de las infraestructuras de transporte del agua y de la disponibilidad de tecnologías de ahorro y control del consumo⁵.

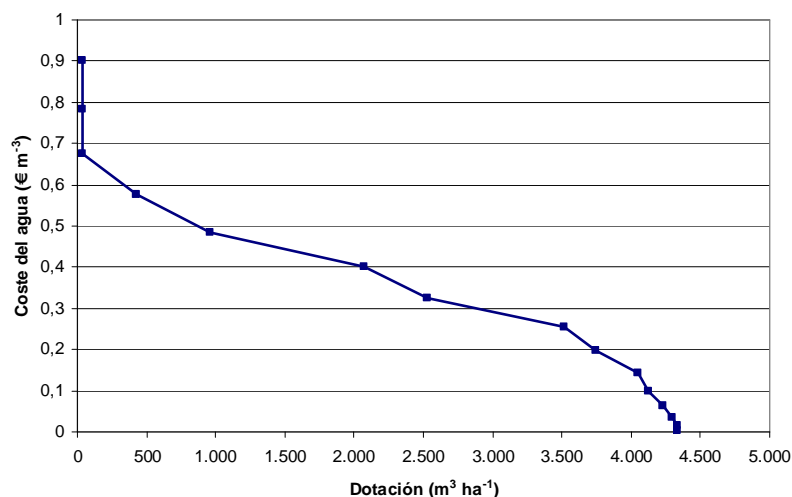
A modo de ejemplo, y sin desviar la atención hacia una zona regable en particular, se incluyen sendas figuras, que relacionan el consumo con los costes del agua, en términos de valores medios a una escala supralocal. Relacionando el consumo con el precio pagado por este recurso en diversas zonas regables de España, la figura 5 muestra que, a precios bajos (inferiores a 0,078 € m³), el consumo no muestra una gran dependencia con el precio, usándose, en general, las dotaciones concedidas (por encima de los 4.000 m³ ha⁻¹). Más bien, se observa una función descendiente con variaciones con respecto a la tendencia media, debidas a causas locales o específicas, por haber considerado una entidad (España) demasiado grande. En la siguiente figura 6, construida para la Comunidad Foral de Navarra, se relacionan diversas dotaciones de riego con el coste imputable a la unidad de volumen aplicada, apreciándose un comportamiento bastante elástico, a partir de unos pagos bastante bajos (en torno a los 0,04 € m⁻³).

⁴ Los pagos por el agua pueden ser muy elevados en zonas en donde hay escasez de aguas superficiales, tal y como sucede en las cuencas del Mediterráneo y en las islas, en donde más del 40% del suministro se hace con aguas subterráneas o con aguas trasvasadas y desaladas (CEDEX, 2010). Así, por ejemplo, los usuarios del trasvase Tajo-Segura afrontan unos pagos de 0,09 € m⁻³.

⁵ Como señala Massarutto (2003), entre otros, la elasticidad en la respuesta suele ser más baja en zonas en donde ya han sido introducidos mecanismos para el ahorro de agua.

Figura 5. Pagos medios por el agua de riego en función de su consumo, en España

Fuente: Elaboración propia, a partir de MMA (2007), con datos medios del Censo Agrario de 1999 y de la Agencia Catalana del Agua en 2005.

Figura 6. Coste del agua en Navarra, en función de las diversas dotaciones de riego

Fuente: Elaboración propia, a partir de Riegos de Navarra (2009).

En este tipo de funciones es frecuente observar que existen unas ciertas tarifas o precios umbrales, por debajo de los cuales se mantienen los consumos máximos (respuesta inelástica). Así mismo, hay otras tarifas que hacen que el pago por el agua sea tan elevado, que deje de ser suficientemente rentable el cultivo en regadío (“exit price”). En esas situaciones puede incluso resultar preferible cambiar a otro cultivo menos consumidor o simplemente pasar la tierra a secano. En resumen y en términos generales, puede decirse que, mientras los precios estén por encima del precio umbral y por debajo del precio máximo, habrá reducción en la demanda por adaptación marginal de ésta a los incrementos en el precio del agua. Otra cuestión es que esta respuesta sea más o menos elástica. De la revisión bibliográfica efectuada, se desprende que la *inelasticidad* tiene lugar mayormente:

- cuando la facturación del agua representa una pequeña parte de los costes de producción
- cuando la mayor parte del pago por el agua proviene de unos costes fijos
- cuando existen importantes reticencias para cambiar de cultivos o técnicas de riego
- cuando se están aplicando riegos deficitarios
- cuando las redes de riego están lo suficientemente modernizadas como para no poder mejorar más la eficacia en el transporte de agua

En MMA (2008) se recopilan una serie de valores de *precio umbral*, obtenidos por diversos investigadores, por encima de los cuales la demanda de agua comienza a ser elástica. El rango está comprendido entre 0,00 y 0,20 € m³, si bien, en la gran mayoría de los casos, se está por debajo de los 0,10 € m³, siendo 0,06 € m³ el valor más repetido. De éstos y otros muchos estudios revisados, se pone de manifiesto que el *precio umbral* se sitúa mayormente en unos 0,07 ó 0,08 €₂₀₁₁ m⁻³ ⁶. Tarifas de este orden y superiores permitirían en teoría reducir el consumo de agua de riego. Pero están bastante por encima de lo que se cobra realmente en muchas zonas, tal y como pone de manifiesto el trabajo de Rodríguez Ferrero *et al* (2008), para toda Andalucía, del que se desprende un coste medio del agua inferior a los 0,05 €₂₀₁₁ m⁻³.

4.1.3. La utilidad de las tarifas de riego: reflexiones

Si las dotaciones de riego fueran asignadas a través de un mercado del agua, el precio reflejaría el valor marginal otorgado por vendedores y compradores, y las transacciones permitirían una reasignación continua, en función del valor del recurso en cada momento. En ausencia de mercados, un “precio administrado” puede en teoría aproximarse a ese valor, siempre y cuando sea definido a un nivel en el que oferta y demanda se equilibran. Bajo ese supuesto, los precios constituirán un mecanismo apropiado para gestionar la escasez del recurso, y a la vez maximizar el bienestar económico agregado, más eficiente que la asignación arbitraria de cuotas desiguales entre los usuarios.

La tarificación del agua aspira a generar unos ingresos suficientes para cubrir los costes asociados a la prestación de los servicios del agua. Unos costes que deben ser entendidos en sentido amplio, algunos de difícil cuantificación, cuando se pretende dar cumplimiento a la

⁶ Rieu (2005) obtiene un valor análogo para la cuenca de río Charente, en Francia, en donde sin embargo los consumos son bastante inferiores a los de la mayoría de las zonas regables de España. Esto pone de relieve la influencia de la renta y del poder adquisitivo de los agricultores, a la hora de pagar por los servicios del agua.

Directiva Marco del Agua (DOUE, 2000). No obstante, la determinación de los precios que permiten la recuperación de dichos costes depende mucho de la forma de valorarlos, en especial, si abarcan los costes ambientales y del recurso, y también del criterio utilizado para estimar la depreciación de las infraestructuras de riego y de la inclusión o no de todos los subsidios agrarios. El origen del agua impone a su vez una tarificación desigual, en tanto que los costes financieros de alumbramiento de aguas subterráneas son en principio pagados íntegramente, a diferencia de lo que sucede con las aguas superficiales, no así los costes ambientales de una posible sobre-explotación de los acuíferos (Berbel y Gutiérrez, 2005).

Por otro lado, están bastante generalizadas las excepciones al principio de recuperación de costes por criterios sociales o de equidad, según los cuales, en la determinación de las tarifas se deberían tener en cuenta las distintas situaciones de los usuarios. En las sociedades modernas todos los ciudadanos han de contribuir al sostenimiento de los gastos públicos, atendiendo a su capacidad económica, a la vez que se les reconoce el acceso a determinados bienes y servicios. Las particulares circunstancias de cada comunidad y tipo de regante, y su separación en categorías diferentes, de acuerdo a su utilización del agua y a la valoración marginal del producto final, debería tenerse en cuenta a la hora de diseñar tarifas, para evitar perjudicar a los más desfavorecidos (MMA, 2007).

Pero la utilidad de los sistemas tarifarios no se limita a la recuperación de los costes de los servicios del agua. Evaluar esta utilidad es una tarea muy complicada; tanto que puede resultar más prudente centrarse en alguno de los aspectos sobre el cual los precios del agua tienen incidencia. Así, además de la recuperación de costes, la utilidad de unas tarifas adecuadas puede estar en un uso más eficiente de los recursos hídricos, de modo tal que se pueda lograr un consumo más razonable, sin que por ello los regantes incurran en pérdidas sustanciales de renta. O también, la utilidad de esos sistemas puede ceñirse a la salvaguarda de las masas de agua, en el modo en que contribuyan a preservarlas.

Para abordar el papel de las tarifas en el uso del agua, resulta esencial el análisis de la elasticidad de la demanda de agua al precio, cuestión ésta sobre la que parece haber bastante desacuerdo. Así, se desprende de algunas publicaciones que, ante un incremento del precio del agua, los regantes no suelen optar por dar riegos deficitarios. Más bien, lo que hacen es pasarse a cultivos menos demandantes de agua o directamente al secano (véase Sunding *et al*, 1997; Schuck y Green, 2001; o Riesgo y Gómez-Limón, 2002). Por el contrario, otros trabajos, como

el de Iglesias y Blanco (2008), en coherencia con investigaciones basadas en enfoques econométricos (Schoengold *et al*, 2006) y con la evidencia empírica (OCDE, 2009), revelan que la demanda de agua, si bien depende de factores locales, tiene un comportamiento bastante elástico con respecto a las tarifas de riego.

No todas las zonas regables tienen la misma capacidad para absorber gastos adicionales, puesto que ni tienen la misma capacidad de pago ni soportan el mismo nivel de costes por los servicios del agua. De este modo, las subidas de precios sólo deberían aplicarse en caso de ofrecerse nuevos servicios de valor añadido o aplicarse mejoras relevantes a los existentes (Riegos de Navarra, 2009). En general, las zonas más modernizadas, y en particular las que requieren elevaciones de agua, soportan mayores costes que las tradicionales, por lo que las primeras son más sensibles a la subida de las tarifas, aunque también es cierto que presentan por lo general unas productividades más altas. Análogamente, los cultivos más rentables (frutales y hortícolas) admiten pagos más elevados por el agua, siendo para ellos más rígida su demanda. Los efectos de una subida del precio en estos casos, más que un ahorro de agua, son una disminución de la renta de los agricultores y una mayor recaudación. Estas ideas se desprenden del trabajo de Berbel y Gutiérrez (2005). A su vez, el estudio de Riegos de Navarra (2009) pone de relieve que, en zonas con variedad productiva, pueden admitirse precios del agua superiores, a raíz de una elevada capacidad de sustitución de cultivos, si bien esto puede producirse a costa del incremento de la utilización de factores tales como el nitrógeno y los combustibles, o de una reducción del nivel de ocupación laboral.

Existen otras circunstancias que pueden condicionar la eficacia de los sistemas de tarificación en la demanda de agua, tanto por parte de los agricultores (Gómez Limón y Riesgo, 2004) como de las explotaciones (Colino y Martínez, 2007). Como se desprende en esta última referencia, en las explotaciones más eficientes cabe esperarse una mayor disposición a pagar por el agua, e, igualmente, una relación positiva entre el precio pagado y los niveles de eficiencia (lo cual corrobora el hecho de que un precio mayor en un insumo induce a una mejor gestión del mismo). Así pues, si a todo lo anterior añadimos el a veces impredecible comportamiento de los agricultores y la variabilidad de los mercados y los subsidios agrarios⁷, encontramos serias dificultades para generalizar resultados.

⁷ Son varios los trabajos que defienden que el desacoplamiento de las ayudas, por el que se instauró un pago único por explotación, independientemente de lo que se cultive, contribuye a reducir la demanda de agua. Según el Plan Especial del Alto Guadiana (2003), cuando los precios son suficientemente altos, se puede conseguir una reducción drástica en la demanda de agua del Acuífero 23, bastante mayor que bajo el escenario de la Agenda

En consecuencia, podemos afirmar que la elasticidad de la demanda de agua en respuesta a su precio parece estar determinada por otros factores colaterales, variables de unas zonas a otras. La elasticidad final dependerá de unas “elasticidades parciales”, propias de cada nivel de decisión y de la mayor o menor rigidez de las explotaciones con respecto a estas decisiones, mayormente de tipo estructural, como son la capacidad financiera o el horizonte temporal contemplado por el agricultor. En este sentido, la aceptación de una subida de tarifas se verá condicionada por tres niveles de decisión: modernizar el sistema de riego, reservar el agua para los cultivos más productivos e introducir otros menos demandantes, y asumir programas de riego deficitario. Por eso, una política tarifaria aislada, sin otras medidas complementarias, como la modernización del regadío o el asesoramiento a los regantes, puede no ser eficiente. Como tampoco lo será una política tarifaria única e indiscriminada, que no tenga en cuenta la elasticidad de la demanda.

Otra idea bastante extendida que se desprende de varias publicaciones es que, cuando se busca el ahorro de agua en el regadío, la fijación de *cuotas* ofrece una mayor seguridad que las tarifas (Bate, 2002; Garrido, 2002; Cornish *et al*, 2004; Banco Mundial, 2006; Molle, 2009). Otras reflexiones en este sentido se dan en Bosworth *et al* (2002), en Dinar y Maria Saleth (2005) o en Navarro *et al* (2007), y se ponen de relieve con la tarificación binómica prevista en el Decreto Foral de Navarra 59/2003 (BON, 2003), con penalizaciones para los consumos excesivos e injustificados de agua. La asignación de cuotas admite varias posibilidades, pero resulta lógico que se establezca sobre la base de unas dotaciones objetivo para cada cultivo (Riegos de Navarra, 2009), y, cabe añadir, de la disponibilidad del recurso.

No obstante, también es común la idea de que un adecuado sistema de precios debe complementar al régimen concesional (Rieu, 2005), y que dicha combinación resulta útil para reducir la demanda en función de los déficits ocasionales, cuando cae la oferta (Molle, 2009). Esta dualidad resulta entonces fundamental para conseguir un control eficiente en el uso del agua; a causa, por un lado, de la respuesta inelástica de la demanda al precio que se da en muchos lugares, y, por otro, de que, entre tanto los costes ambientales no sean internalizados, el sistema de cuotas permite establecer la adecuada utilización del agua, bajo la cual esas externalidades se minimizan).

2000. Mejías *et al* (2004) indican que, en Andalucía, el desacoplamiento de las ayudas puede contribuir a atenuar las pérdidas que ocasiona un incremento de las tarifas del agua.

De todo lo anterior, y como reflexiones finales, podemos señalar que la utilidad de la tarificación del agua de riego está supeditada en buena medida a ciertas cuestiones de importancia especial. El pronunciamiento sobre esa utilidad exige no obstante la realización de estudios empíricos de eficiencias comprobadas en su aplicación.

- i)* Los sistemas de tarifas se han de adaptar a la situación económica del colectivo sobre el que se aplican y a los objetivos de gestión del agua, evolucionando desde los originariamente concebidos para recuperar costes, a los más sofisticados, diseñados en función de la renta privada, los costes ambientales y los costes de oportunidad por no regar.
- ii)* Se podría aplicar una tarifa mayor a los regantes que presentan una elasticidad menor de la demanda al precio, y viceversa, individualizando por tanto las tarifas por cultivos, en función del beneficio esperado. No obstante, esto podría revestir una práctica monopolista de discriminación de precios, cuyas implicaciones habría que estudiar detenidamente.
- iii)* Las dotaciones deberían ser flexibles y transparentes, continuamente revisadas y adaptables a la disponibilidad del recurso y a las necesidades reales del mismo. En este sentido, sería deseable que las comunidades de regantes elaboraran sus planes de necesidades a lo largo de la campaña de riego, en función del clima y de la escasez de cada año. La distinta demanda y disponibilidad de recursos tal vez podría aconsejar una tarifa también distinta a lo largo del año.
- iv)* Así mismo, en la determinación de las tarifas sería apropiado tener en cuenta la calidad y la garantía del suministro del agua e, incluso, la información sobre los retornos de riego y su contribución al ciclo hidrológico y a la conservación de los ecosistemas.

4.2. DISEÑO DE TARIFAS DEL AGUA DE RIEGO CON SANCIONES AL CONSUMO EXCESIVO

Artículo “Devising irrigation water tariffs with overconsumption penalties”. *Spanish Journal of Agricultural Research* (2011) 9(4), 971-980.

Autores: Javier Alarcón, M. Azahara Mesa-Jurado y Julio Berbel.

4.2.1. Introducción

En las zonas áridas es habitual que la escasez de recursos hídricos imposibilite satisfacer todas las demandas potenciales. En general, el uso de recursos escasos puede generar ventajas competitivas importantes, imponiéndose por ello la necesidad de gestionar adecuadamente tales recursos, para poder satisfacer las demandas, incluidas las ambientales, y mantener al mismo tiempo sistemas suficientemente competitivos, ajustando en cada momento la actividad económica a las exigencias del mercado y a la disponibilidad de aquéllos (Chaharbaghi y Lynch, 1999).

En situaciones de escasez, en las que un uso abusivo del agua puede llegar a ocasionar un deterioro del medio ambiente, es cuando cobra especial relevancia la idea conceptual de coste del recurso. Como apuntan Ferrer y La Roca (2006), bajo climas áridos o semiáridos sería coherente una gestión eficiente de estos episodios de escasez hídrica, con la cual los perjuicios que puedan derivarse sean asumidos y compartidos entre los usuarios y los ecosistemas.

La Directiva Marco del Agua (DOUE, 2000) exige a los países miembros un análisis económico del uso del agua lo suficientemente completo como para poder aplicar el principio de recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua, incluidos los costes medioambientales y los relativos a los recursos. Estos últimos pueden asociarse a los costes de oportunidad que surgen al asignar un recurso a un usuario específico y no a otro (Berbel *et al*, 2007b).

A su vez, en la Directiva Marco se insta al empleo del sistema de precios, como instrumento eficaz para regular el consumo y promover un uso sostenible del agua y su conservación (Cornish y Perry, 2003; Hellegers y Perry, 2004). Navarro *et al* (2007) defienden que la instalación de contadores y el establecimiento de tarifas que ayuden a ajustar las dosis de riego

y graven el gasto real de agua, sobre la base de unas dotaciones objetivo para cada cultivo, permitiría ahorrar agua y, a la par, bonificar a los regantes eficientes y penalizar a los ineficientes. La tarificación resulta especialmente útil en situaciones en las que se superan las dotaciones óptimas, en la medida en que puede incidir considerablemente en la reducción de la demanda. Esto resulta trascendental en situaciones de escasez.

Por su parte, Molle (2009) concluye, tras una amplia revisión de casos, que la gestión racional del agua se deriva en mayor medida de la introducción de unas cuotas transparentes y flexibles, adaptables a situaciones cambiantes de disponibilidad del recurso, mediante una gestión plurianual y preventiva de las sequías. Con ello se evitaría tener que recuperar costes ambientales, pues éstos no se llegarían a producir. El uso de tarifas y asignaciones del agua ha sido ampliamente estudiado en la literatura, y se han obtenido resultados adecuados con el propósito de reducir el consumo de agua en el regadío, cuando el valor de este recurso es desigual entre los agricultores (ver, por ejemplo, Chohin-Kuper *et al*, 2002 ; Rieu, 2005 ; o Rodríguez Ferrero *et al*, 2008).

En el presente trabajo se pretende diseñar un modelo que permita obtener un sistema eficiente de tarificación del agua de riego, con el cual disuadir de posibles consumos excesivos. Como luego se razonará, el cálculo del coste de oportunidad que resulta de ajustar el consumo a unas dotaciones máximas, sirve para fijar sanciones eficientes a todo consumo extra, siempre y cuando se disponga de las funciones de valor o productividad marginal del agua para cada cultivo y en cada lugar.

4.2.1.1. Asignación socialmente óptima del agua de riego

Siendo el agua de riego un bien económico, para fijar su precio deberemos considerar los costes relativos a su suministro, uso y gestión, así como los beneficios que se perciben de su uso (Altmann, 2007). La Directiva Marco del Agua impulsa el análisis de recuperación de costes de los servicios de agua, en cumplimiento de sus artículos 5 y 9 y su anexo III. Los costes asociados al uso del agua se pueden dividir en tres tipos: costes financieros, que son los relativos a los servicios del agua (incluyendo los costes de prestación y administración de tales servicios, los costes de operación y mantenimiento o los costes de capital); los costes ambientales, que se refieren a los costes derivados del impacto negativo que el uso no sostenible de los recursos hídricos tiene sobre el medio ambiente; y los costes del recurso, que

representan el coste de oportunidad asociado a las pérdidas de los usuarios por no poder utilizar el recurso, debido a su agotamiento o sobre-explotación.

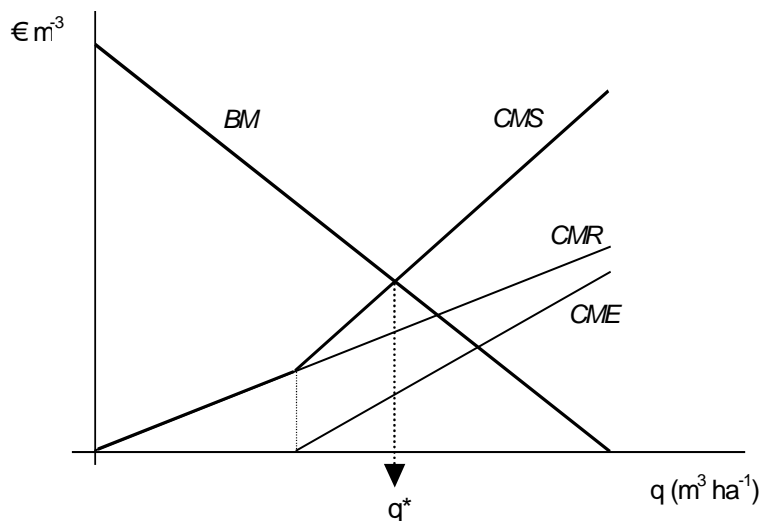
Estos costes determinan el uso recomendable de un recurso como el agua de riego, en situación de óptimo social, el cual se produce teóricamente cuando se iguala el beneficio marginal privado neto, BM , y el coste marginal social, CMS . Pearce y Turner (1995) muestran un modelo semejante para deducir el consumo socialmente óptimo de un recurso natural o el nivel óptimo de contaminación, si bien consideran el precio del bien producido, y no el de uno de los insumos, como sucede aquí con el agua.

De acuerdo con estos autores, el coste marginal social se define como la combinación del coste marginal externo o ambiental, CME , y el coste marginal del usuario, equivalente al aquí denominado coste del recurso, CMR :

$$BM = CMS = CME + CMR \quad (8)$$

Esto lo podemos ver fácilmente en la figura 7, en donde q^* representa la cantidad del recurso agua de riego que se debe consumir en condiciones de óptimo social.

Figura 7. Asignación de agua de riego socialmente óptima



La complejidad de dicha asignación radica en la dificultad de cuantificar todas las externalidades. En la práctica, el régimen concesional de derechos al uso del agua está muy extendido, pues permite definir un uso adecuado del recurso, bajo el cual esas externalidades se minimizan, siempre y cuando la asignación se haga en función de las reservas disponibles y los caudales ecológicos necesarios para lograr un buen estado ecológico y químico de las masas de

agua. No obstante, la integración de la función de valor marginal BM , entre dos niveles de suministro, proporciona una buena estimación del beneficio asociado al uso del agua de riego.

Aunque en varios estudios se manejan curvas de demanda del agua de riego, obtenidas aplicando diferentes metodologías (ver, por ejemplo, Berbel y Gómez-Limón, 2000, o Berbel *et al*, 2009), en la mayoría se expresa esa demanda a nivel de explotación, con mezcla de cultivos (p.e., Gómez-Limón *et al*, 2001, o Navarro *et al*, 2007). Son escasos los trabajos que ofrecen datos de productividad o beneficio marginal del agua a nivel de cultivo.

4.2.1.2. Sistemas de tarificación del agua de riego

En los costes privados, C , que deben deducirse a los ingresos, I , para calcular el beneficio del regante, B , podemos diferenciar los que se deben al uso del agua, C_A , de los que no, C_{NA} . Y dentro de aquéllos, podemos separar los que responden al pago de la tarifa de agua, C_t , del resto, C_{nt} . De este modo:

$$B = I - C = I - (C_{NA} + C_A) = I - [C_{NA} + (C_{nt} + C_t)] \quad (9)$$

El precio del agua habría de ser entonces mayor que los costes financieros de los servicios del agua, si la intención es no sólo aplicar el principio de recuperación de costes, sino incluir además los costes ambientales y sociales, tal y como propone la expresión 8. El valor de C_t se define como $C_t = t_A \cdot q$, siempre y cuando t_A sea la tasa o tarifa de utilización del agua que se habría de cobrar por cada metro cúbico. De este modo, resulta que $CM_t = t_A$. Esta tarifa volumétrica, t_A , considerada por algunos autores como “precio administrado” del agua, puede adoptar diferentes formas, y según sean éstas, podemos definir correlativamente los siguientes sistemas de tarificación:

- i) Una única tarifa “plana” por superficie de riego, independientemente del consumo de agua que se haga.
- ii) Una tarifa única, para cualquier unidad volumétrica que sea aplicada, independientemente de cuál sea el consumo total: $t_A = k$.
- iii) Distintas tarifas, definidas según bloques de consumo:

$$t_A = \begin{array}{ll} k_1 \leftrightarrow & q < Q_1 \\ k_2 \leftrightarrow & Q_1 < q < Q_2 \\ k_3 \leftrightarrow & Q_2 < q < Q_3 \\ \dots & \end{array}$$

- iv) Un sistema de tarifas volumétricas completamente progresivo: $t_A = m(q) \cdot q$, o cualquier otro tipo de función no lineal creciente con q .

Las sanciones o penalizaciones vendrán de la imposición de recargos cuando se sobrepasa una cierta asignación, que se presupone óptima. Esta situación se da, por su propia definición, en *iii*) y en *iv*), dado que la tarifa unitaria o volumétrica aumenta en relación directa al incremento del consumo, ya sea de forma discreta o continua.

Es bastante habitual repartir el agua con criterios de igualdad, de manera que el regante adapta su producción a la dotación que recibe. Con ello, no resulta raro que algunos cultivos se rieguen más de lo necesario, mientras que otros reciben riegos deficitarios o incluso se destinan a secano. Una opción es asignar cuotas específicas por cultivos, según sus necesidades teóricas, y, en el caso de que las dotaciones hayan de ser reducidas, redefinir esas cuotas atendiendo a las consiguientes pérdidas de beneficio.

Un ejemplo de tarificación volumétrica por bloques de consumo es el que fue propuesto para Navarra (MARM, 2008): a los consumos que superan entre un 10 y un 20% la dotación asignada, se les aplica una tarifa del agua incrementada en un 300%; y cuando los riegos exceden en más del 20% dicha dotación, el recargo es del 500%. Se consideró a su vez un sistema de tarificación individualizado por cultivos, con una metodología sencilla de cálculo, que utiliza la discriminación de grupos de cultivos que se señala en la Instrucción de Planificación Hidrológica (BOE, 2008), así como las exigencias de agua que allí se recogen para ellos en cada cuenca hidrográfica. Con éstas, y teniendo en cuenta además el sistema de riego más apropiado para cada cultivo, se calcula el ahorro porcentual de agua que puede alcanzarse con cada sustitución de cultivos, tomando como grupo de menor consumo el de los cereales de grano. En función de la disminución o el incremento de la cantidad de agua que se exigiría con cada una de las posibles sustituciones, y partiendo de la tarifa asignada al cultivo de referencia, se estiman correlativamente las tarifas a aplicar a cada grupo de cultivos.

Este sistema de cuotas específicas por cultivos y de tarificación volumétrica ha permitido lograr un cierto ahorro de agua en el Valle del Jordán, y además ha incentivado a los agricultores a modernizar sus sistemas de riego (Molle *et al*, 2008). En Israel, el agua para la agricultura se diferencia según la calidad, asignándose un precio medio a las aguas de calidad alta, otro para las aguas parcialmente salobres y otro distinto para las aguas residuales tratadas.

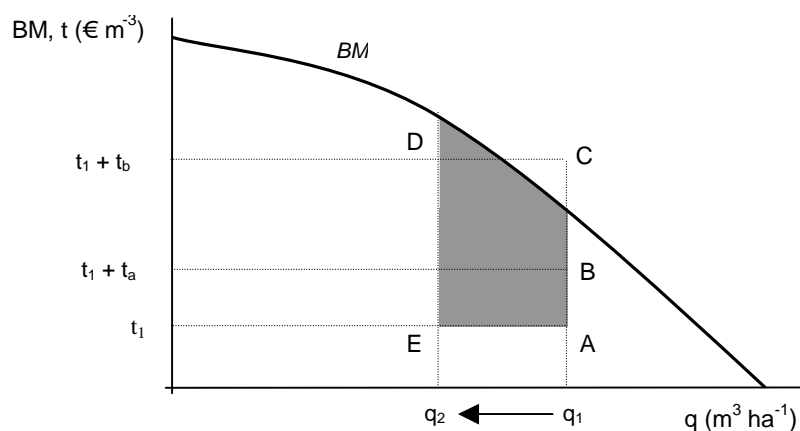
Al menos para las primeras, se establece un sistema de tarificación diferenciado según una cuota original de referencia, que es la del año 1989: hasta el 50% de esa cuota, el agua se cobra a 0,691 NIS⁸ por m³; del 50 al 80% de aquella, a 0,833 NIS m⁻³, lo que supone un incremento en la tarifa del 20,5%; y, para consumos por encima del 80%, a 1,118 NIS m⁻³, equivalente a una subida del 61,8% con respecto a la tarifa inicial (Fernández Buckley, 2001).

4.2.2. Métodos

La metodología que se describe a continuación se basa en el establecimiento de sanciones o penalizaciones a los consumos superiores a las dotaciones objetivo o recomendables en cada momento, las cuales se relacionarán con la disponibilidad del recurso. Las sanciones se fijan a partir de la curva de beneficio marginal privado neto, *BM*, para un determinado cultivo o explotación, en función de la cantidad de agua utilizada, *q*, en una zona regable específica (figura 8).

Por lo tanto, para establecer tarifas con las que disuadir el despilfarro, se requiere que: *i*) la curva *BM* permita estimar, específicamente para cada punto, la ganancia marginal que se obtiene con cada fracción de agua que es utilizada; *ii*) la integración de la curva *BM*, hasta un cierto nivel de uso del agua, proporcione la ganancia económica que puede ser atribuida a ese uso. De este modo, el modelo sólomente podrá ser fiable, si las curvas *BM* han sido definidas con precisión.

Figura 8. Asignación de tarifas y sanciones al consumo excesivo, *t*, en función del beneficio marginal obtenible del agua utilizada, *BM(q)*



⁸ 1 NIS (Nuevo Shekel Israelí) equivalía a unos 0,20 € a finales de 2011.

Es frecuente encontrar casos en los que se está regando por encima de lo necesario o de lo social o ambientalmente recomendable, incurriendo por tanto en un derroche o consumo excesivo. Esta situación se muestra en la figura 8, en donde la asignación inicial q_1 es tan alta que ocasiona unos significativos costes externos y de oportunidad, por lo cual debería reducirse. Dicha reducción podría hacerse hasta q_2 , a partir de la cual desciende notoriamente el BM , pudiéndose denominar en consecuencia “asignación crítica”. Aún así, siempre y cuando la tarifa del agua sea suficientemente baja, al regante le convendrá aplicar la dotación original, q_1 , ya que le permite seguir obteniendo un beneficio mayor. El mismo se puede medir con el área sombreada bajo la curva BM entre q_1 y q_2 , cuyo valor viene dado por la ecuación:

$$BR_1 - BR_2 = \int_{q_2}^{q_1} BM(q) dq - \int_{q_2}^{q_1} t_1 dq \quad (10)$$

siendo BR el beneficio obtenido del agua de riego y t_1 la tarifa que paga el regante por su uso.

Obsérvese que $BR_1 - BR_2 \neq BR(q_1) - BR(q_2) = \int_{q_2}^{q_1} BM(q) dq$.

Esta ganancia extra para un determinado regante que se deriva del uso de un volumen $q_2 - q_1$ puede ser percibida por el resto de regantes como un coste indeseado, en el sentido de que están siendo privados del uso de esa misma cantidad de agua. Este coste, de valor $BR_1 - BR_2$, sería el coste de oportunidad de no percibir dicha cantidad.

Sobre esta base, si el objetivo es lograr un consumo eficiente del recurso, se podría introducir un sistema tarifario en el que se gravara convenientemente el consumo por encima de las dotaciones permitidas, con el cual disuadir al regante de hacer consumos abusivos de agua. Para ello, la penalización, sanción o incremento de tarifa que se impusiera deberá ser superior al beneficio adicional mencionado: $S > BR_1 - BR_2$. El cobro de esta sanción podría permitir recuperar el coste del recurso inherente al consumo $q_1 - q_2$. Esta penalización podría gravar todo el consumo, con una misma tarifa extra añadida a la original; o sólo el consumo indebido, mediante una tarifa adicional aplicable únicamente al volumen que sobrepasa la asignación estipulada, diferenciando pues bloques de consumo. Dado que en ambos casos se aplicarían tarifas desiguales, dependiendo de que el consumo sobrepase o no esa asignación objetivo, se trata de sistemas de tarifas progresivas.

Así, para que la sanción se pueda considerar eficiente, vemos en la figura 8 que, para el primer caso (a), se deberá cumplir que el área determinada por $t_1AB(t_1+t_a)$ sea mayor que el área sombreada; y, en el segundo (b), que lo sea el área ACDE. Para cada uno de los dos sistemas, una vez asignada la cuota eficiente q_2 , se puede calcular la tarifa, también eficiente, que se habría de cobrar por el agua de riego realmente utilizada, q . En ambos casos, si se respeta la cuota ($\forall q < q_2$), no procede sanción alguna, de modo que se mantendría la tarifa inicial t_1 .

a) Sistema de tarifas progresivas indiferenciadas

$\forall q \leq q_2$, se aplica la tarifa original t_1

$\forall q > q_2$, se aplica una nueva tarifa, de valor $t_1 + t_a$, única e indiscriminada para toda la cantidad de agua que es utilizada

Esta t_a que es añadida a t_1 puede obtenerse a partir de la siguiente formulación:

$$S > BR_q - BR_2 \rightarrow q \cdot \int_{t_1}^{t_1+t_a} dt > \int_{q_2}^q BM(q) dq - \int_{q_2}^q t_1 dq \quad (11)$$

e, integrando y despejando t_a

$$t_a > \frac{BR(q) - BR(q_2)}{q} + t_1 \left(\frac{q_2}{q} - 1 \right) \quad (12)$$

Cuando la función BM es lineal, la expresión anterior puede escribirse como

$$t_a > \frac{m \cdot (q^2 - q_2^2)}{2 \cdot q} + k \frac{(q - q_2)}{q} + t_1 \left(\frac{q_2}{q} - 1 \right) \quad \forall BM(q) = m \cdot q + k \quad (13)$$

donde m es la pendiente de esa recta ($m = \frac{\partial BM(q)}{\partial q}$) y k su término independiente.

La sanción correspondiente vendrá dada por la diferencia entre lo que se pagaría con esta nueva tarifa y lo que se pagaba originalmente: $S_a > t_a \cdot q$. Y, en caso de sanción, el pago total por el agua utilizada valdría $T_a = (t_1 + t_a) \cdot q$.

b) Sistema de tarifas progresivas diferenciadas

$\forall q \leq q_2$, se aplica la tarifa original t_1

$\forall q > q_2$, se aplica una nueva tarifa, de valor $t_1 + t_b$, únicamente al consumo excesivo $q - q_2$, manteniéndose t_1 para la parte que queda por debajo de q_2

Según esto, podemos calcular t_b a partir de la siguiente formulación:

$$S > BR_q - BR_2 \rightarrow (q - q_2) \cdot \int_{t_1}^{t_1+t_b} dt > \int_{q_2}^q BM(q) dq - \int_{q_2}^q t_1 dq \quad (14)$$

Ahora bien, teniendo en cuenta que $(q - q_2) \cdot \int_{t_1}^{t_1+t_b} dt = t_b \cdot \int_{q_2}^q dq$, obtenemos

$$t_b > \frac{BR(q) - BR(q_2)}{q - q_2} - t_1 \quad (15)$$

Cuando la función BM es lineal, la última expresión puede escribirse como

$$t_b > \frac{m \cdot (q^2 - q_2^2)}{2 \cdot (q - q_2)} + k - t_1 \quad \forall BM(q) = m \cdot q + k \quad (16)$$

donde m es la pendiente de esa recta ($m = \frac{\partial BM(q)}{\partial q}$) y k su término independiente.

La sanción correspondiente se aplicará exclusivamente al consumo por encima de q_2 , con la nueva tarifa así calculada: $S_b > t_b \cdot (q - q_2)$. En este caso, el pago total, T_b , vendrá de añadir dicha sanción al producto $t_1 \cdot q$.

Igualando las expresiones obtenidas para S con la opción de tarificación a) y con la b), se obtiene el mismo resultado. Esto es lógico, ya que ambas se han diseñado para un mismo objetivo: el de contrarrestar las ganancias indebidas de quien riegue por encima de las dotaciones objetivo que se asignen en cada momento y situación.

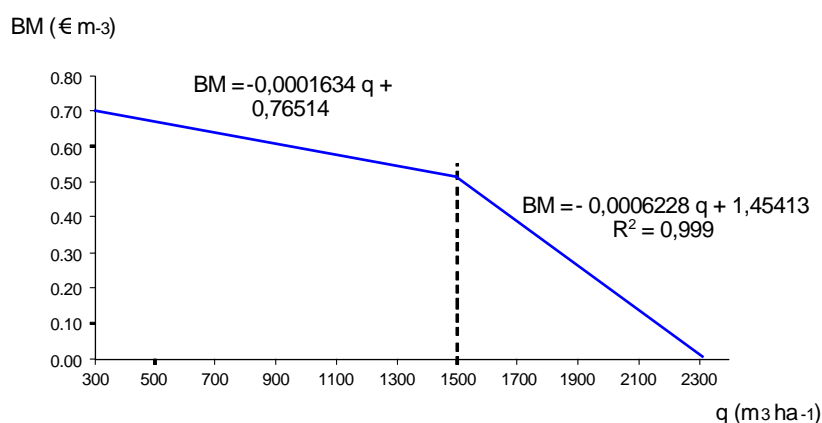
4.2.3. Estudio de caso

En esta sección se aplica el modelo teórico descrito previamente a un estudio de caso centrado en el cultivo del olivar de regadío en la subcuenca del río Guadalbullón, en el Alto Guadalquivir. Dentro del déficit global de la cuenca del río Guadalquivir, la del Guadalbullón presenta una especial problemática, al ser una subcuenca ‘no regulada’ y asentarse en sus márgenes importantes riegos, principalmente de olivar. La función de beneficio marginal del

agua de riego (figura 9) ha sido obtenida por regresión de los datos originales de la función de producción del agua de riego del trabajo de Mesa-Jurado *et al* (2010), en el cual se adapta la función de producción obtenida por Moriana *et al* (2003) a la zona del Guadalbullón y su sistema de producción.

La asignación para los nuevos olivares de regadío en la Cuenca del Guadalquivir se establece en 1.500 m^3 por hectárea y año, pero en la subcuenca del Guadalbullón los regantes de olivar rara vez pueden disponer de esta cantidad. La dotación media percibida en los últimos cuatro años estaba alrededor de los $1.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, de acuerdo a los datos obtenidos por estos autores, a través de entrevistas a las comunidades de regantes de la zona. La figura 9 muestra el valor o beneficio marginal del agua utilizada, una vez que los costes marginales (incluidos los costes de riego y recolección) han sido deducidos de los ingresos marginales. Los valores obtenidos son de $0,60 \text{ € m}^{-3}$ para la dotación anual de $1.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y de $0,53 \text{ € m}^{-3}$ para la de $1.500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (datos medios para el periodo 2005-2008). La discontinuidad en la curva alrededor de los $1.500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ es debida a la saturación del sistema con la actual densidad de plantación (100 árboles por hectárea). Obviamente, se trata de una estimación que ilustra una determinada explotación tipo representativa del olivar de regadío del Alto Guadalquivir.

Figura 9. Beneficio marginal del agua vs. Asignación, para el olivar de la subcuenca del Guadalbullón



Fuente: Elaboración propia, a partir de Mesa-Jurado *et al* (2010).

4.2.4. Resultados

Siguiendo el fundamento teórico expuesto, y una vez estimada la función *BM*, se ha diseñado el sistema de tarifas a introducir en el olivar del Guadalbullón, con el objeto de, reduciendo las

asignaciones, disuadir el consumo excesivo de agua. Hay que tener en cuenta que, para este caso, la pendiente m es diferente, dependiendo de que el consumo q esté por encima o por debajo de la dotación crítica ($1.500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), la cual determina el punto de inflexión de BM . En la tabla 2 se exponen los resultados obtenidos con los dos sistemas de tarificación presentados en la metodología. Como se puede apreciar, las sanciones surgen únicamente cuando se sobrepasan las dotaciones objetivo. Asumiendo una tarifa original $t_1 = 0,35 \text{ € m}^3$, se han planteado las situaciones de que el regante cumpla o no con la dotación estipulada q_2 . La última columna recoge el coste del agua que habría de afrontar un regante, para el riego de una hectárea de olivar bajo los dos sistemas de tarificación analizados, y asumiendo, si cabe, las correspondientes sanciones. Como puede observarse, para ambas opciones resultan las mismas sanciones y los mismos costes, al compartir un mismo objetivo.

Tabla 2. Ejemplo de tarifas, t , sanciones al consumo excesivo, S , y coste del riego, T , bajo dos sistemas de tarifas progresivas, indiferenciadas y diferenciadas por bloques de consumo

	q ₁	q ₂	BM	t (€ m ⁻³)	S (€ ha ⁻¹)	T (€ ha ⁻¹)
Sistema de tarifas progresivas indiferenciadas (a)						
∀ q ≤ q ₂	1 000	1 000	- 0,0001634 q + 0,76514	t ₁ = 0,35	S = 0	T = t ₁ q ₂ = 350
∀ q > q ₂	1 500			t > t ₁ + t _a = 0,42	S > t _a q ₁ = 105,43	T > t ₁ q ₁ + S = 630,43
∀ q ≤ q ₂	1 500	1 500	- 0,0006228 q + 1,4541	t ₁ = 0,35	S = 0	T = t ₁ q ₂ = 525
∀ q > q ₂	2 000			t > t ₁ + t _a = 0,36	S > t _a q ₁ = 7,16	T > t ₁ q ₁ + S = 707,16
Sistema de tarifas progresivas diferenciadas (b)						
∀ q ≤ q ₂	1 000	1 000	- 0,0001634 q + 0,76514	t ₁ = 0,35	S = 0	T = t ₁ q ₂ = 350
∀ q > q ₂	1 500			sólo a q ₁ – q ₂ : t > t ₁ + t _b = 0,56	S > t _b (q ₁ – q ₂) = 105,43	T > t ₁ q ₁ + S = 630,43
∀ q ≤ q ₂	1 500	1 500	- 0,0006228 q + 1,45413	t ₁ = 0,35	S = 0	T = t ₁ q ₂ = 525
∀ q > q ₂	2 000			sólo a q ₁ – q ₂ : t > t ₁ + t _b = 0,36	S > t _b (q ₁ – q ₂) = 7,16	T > t ₁ q ₁ + S = 707,16

Nota : cálculos realizados para una $t_1 = 0,35 \text{ € m}^3$.

4.2.5. Conclusiones

En este trabajo se presenta un sistema de tarifas para el agua de riego, que introduce sanciones eficientes para el control de consumos en exceso, sirviendo como instrumento de gestión complementario al de asignación de dotaciones individualizadas por cultivo. Esta tarificación progresiva se construye en función de la pérdida de ingresos que supondría a los regantes el

ajustar sus dosis de riego a unas dotaciones más restrictivas. El fundamento del mismo es propiciar el cumplimiento del principio de recuperación de los costes de los servicios del agua, si bien sus efectos deberían ser cuidadosamente contrastados en su aplicación práctica.

El manejo sostenible de los recursos hídricos debe alcanzarse mediante su asignación socialmente óptima. Esto implica minimizar los costes sociales y privados asociados. En consecuencia: *i)* el agua de riego debería ser asignada según unas dotaciones objetivo específicas para cada cultivo y zona; *ii)* la posible sanción por un riego excesivo habría de ser mayor que el beneficio que puede obtenerse de ese riego, para disuadir de semejante despilfarro o bien recuperar el coste asociado al mismo.

Aplicando el anterior principio, hemos formulado, por un lado, un sistema progresivo en el que se aplica una misma tarifa a todo el volumen que es consumido, aunque dicha tarifa pueda ser distinta según sea ese volumen. Y, por otro lado, un sistema progresivo con tarifas diferenciadas por bloques de consumo. Con ambos se grava el volumen que excede la asignación permitida, mediante una tarifa superior que la que aplicaría a aquel que no lo supera. Con uno y otro se obtiene una misma sanción y un mismo pago por hectárea, como se ha podido ver en un estudio de caso. Este tipo de sistemas progresivos de tarificación volumétrica y sanciones al consumo excesivo, individualizados por cultivos, promueve un uso eficiente del agua, así como su ajuste a la disponibilidad de recursos en cada momento y a la situación de los mercados, especialmente en respuesta a los subsidios agrarios.

Para su correcta aplicación, es esencial conocer tanto las funciones de valor marginal del agua de riego, como los volúmenes consumidos por los agricultores. Con respecto a lo último, cabe resaltar que en la actual legislación española en materia de agua se obliga a los agricultores a la instalación de medidores volumétricos (BOE, 2009). Se debería fomentar además el estudio de las reservas hídricas, de modo que las asignaciones máximas puedan ser revisadas en cada momento, en respuesta a esta disponibilidad.

5. ASIGNACIÓN EFICIENTE DEL AGUA DE RIEGO

5.1. REPARTO ECONÓMICAMENTE ÓPTIMO DE AGUA EN SITUACIONES DE ESCASEZ

Artículo “Optimal water allocation in shortage situations as applied to an irrigation community”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* (2014) 140(3), 04013015.

Autores: Javier Alarcón, Alberto Garrido y Luis Juana.

5.1.1. Introducción

El regadío genera una gran parte de la producción final y del empleo en el sector de la agricultura, muy especialmente en regiones con escasez de recursos hídricos. La Directiva Marco del Agua (DOUE, 2000), supone un impulso importante de las prácticas de gestión, con las que lograr un buen estado de todas las aguas en el territorio europeo. Siguiendo las pautas de la Directiva Marco del Agua, el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001b) establece que la planificación hidrológica tendrá por objetivos generales, entre otros, “la satisfacción de las demandas, el equilibrio y la armonización del desarrollo regional y sectorial,..., economizando su empleo y racionalizando sus usos en armonía con el medio ambiente y los demás recursos naturales”. Para alcanzar estos objetivos, el Reglamento de la Planificación Hidrológica (BOE, 2007b) contempla unos programas de medidas. Pero en ese listado de medidas no se contempla la *reasignación de derechos al uso del agua*, en respuesta por ejemplo a situaciones de sequías, si bien los Planes de Gestión de Sequías aprobados en 2007 (BOE, 2007a) desarrollan los protocolos de actuación y las medidas que se pueden aplicar bajo estas condiciones.

Al regar por encima del nivel de sostenibilidad de las reservas hídricas, se incurre en unos costes ambientales y en unos costes de oportunidad, también llamados costes del recurso (ver epígrafe 4.2.2.). Esta situación suele darse cuando sobreviene un episodio de escasez o de sequía, y, a pesar de ello, se sigue regando con las mismas cantidades de agua que se venían utilizando antes del mismo. En general, en España el sistema de reparto descansa en buena medida en el orden de prioridad de usos establecido en la Ley o en la normativa de planificación vigente, y, a un menor nivel, en los acuerdos de las comisiones de sequía y de desembalses. En las comunidades de regantes, el agua se reparte proporcionalmente, primando

a veces los cultivos leñosos y los considerados como sociales, que demandan más mano de obra (Calatrava y Garrido, 2006). La reasignación o descentralización se articula en las transacciones de derechos al uso del agua (ver, por ejemplo, Garrido *et al*, 2012), incluyéndose como medida complementaria en la Instrucción de Planificación Hidrológica (BOE, 2008) las posibles modificaciones legislativas para facilitar aquéllos. La asignación de derechos es una cuestión fundamental, no solo con vistas a lograr el buen funcionamiento de los mercados del agua, sino también para poder gestionar de forma eficiente y equitativa los cada vez más repetidos episodios de sequía (Lorenzo-Lacruz *et al*, 2013). Resulta oportuno introducir criterios económicos adicionales que ayuden a buscar la eficiencia y también la equidad en la asignación de los derechos del agua.

Los precios, los mercados y las cuotas son los instrumentos claves para regular el uso del agua, pero si no media un adecuado control legal e institucional, no es probable que ninguno de ellos por sí solo conduzca a una asignación eficiente (Tsur, 2009). La regulación puede ser directa, a través de los sistemas de precios, cuotas o una combinación de ambos; o indirecta, con un mercado del agua más o menos controlado institucionalmente. Las posibilidades varían dependiendo de las características físicas (clima, suelos y agua), económicas, culturales, políticas, legales e institucionales en cada caso (Tsur, 2009). Así, las muy diferentes formas de asignar y de cobrar por el agua de riego en el mundo (ver p.e. Johansson *et al*, 2002, o Berbel *et al*, 2007a) reflejan esa variabilidad. Pero, *a priori*, cualquier reparto del agua podría lograrse con apropiado sistema de cuotas o mediante una combinación de cuotas y precios. No obstante, su aplicación puede tener resultados muy diferentes, debiéndose estudiar cuidadosamente, si queremos limitar los daños ambientales y los costes sociales.

En este contexto, Goetz *et al* (2005) simulan la introducción de tres métodos de reparto del agua, con el fin de comparar su eficiencia económica. Además de la regla proporcional y el mercado, consideran la regla de reparto uniforme, desarrollada en la teoría de la elección social. Los resultados permiten concluir que, aunque el mercado conduzca a mejores resultados globales en todos los casos, la regla uniforme puede resultar una alternativa interesante, cuando las dotaciones de agua se encuentran en el intervalo habitual. Sin embargo, en situaciones de escasez severa, el mercado presenta, en teoría, una ventaja clara con respecto a cualquier otra regla de asignación. Goetz *et al* (2005) apuntan al desarrollo de reglas de asignación no anónima, es decir, que tengan en cuenta la diferente productividad de las explotaciones.

Los modelos de optimización están bastante extendidos en la gestión del agua de riego. Permiten maximizar los beneficios en situaciones de demanda competitiva, asignando el volumen disponible a cada usuario en función de su productividad (Reca *et al*, 2001; Shangguan *et al*, 2002; Benli y Kodal, 2003; Letcher *et al*, 2004; Babel *et al*, 2005). Los retornos también han sido tenidos en cuenta en la optimización de asignaciones, comparando los costes ambientales de una sequía y el beneficio del agua en la agricultura (Grafton *et al*, 2010). Pero, como veremos, en situaciones de escasez o restricciones, el solo objetivo de maximizar la producción conjunta en una zona regable puede infringir muy diferentes pérdidas económicas entre los regantes. De hecho, consideraciones de equidad han sido introducidas en la maximización de beneficios en Smout y Gorantiwar (2006) o en Gorantiwar y Smout (2007), viéndose que los objetivos de productividad y equidad pueden entrar en conflicto.

5.1.2. Metodología

Los modelos de optimización a nivel de explotación o zona regable asignan el agua y la tierra a partir del patrón de cultivos. En ellos, además de la limitación en los recursos hídricos y la naturaleza estocástica de la disponibilidad de agua, es habitual aplicar reducciones proporcionales de las dotaciones iniciales. Este trabajo tiene por objeto mostrar cómo se puede obtener un reparto económicamente óptimo del agua, y la información que se necesita para ello. Así mismo, pretendemos poner de relieve el coste de oportunidad que tendría aplicar otras reglas de asignación, como la proporcional.

La base teórica del reparto óptimo de recursos entre distintos individuos o usos es lo que se conoce como asignación óptima de Pareto. Según este principio, los beneficios totales se maximizan cuando el consumo es tal, que los beneficios marginales de todos los usos son iguales en todo momento (Reca *et al*, 2001). Un razonamiento similar puede hacerse considerando, en vez de los beneficios, las pérdidas marginales que pueden surgir en situaciones de escasez de agua.

Las reglas de reasignación, si tienen en cuenta el volumen de agua que realmente es utilizado, pueden ser suficientes para que se cumplan las normas de calidad ambiental, pero no producirán generalmente una asignación Pareto-eficiente del agua. Los autores han encontrado (ver 4.3.2) que la imposición de una misma cuota para todo regante será económicamente eficiente si el grupo es homogéneo; es decir, si todos los regantes obtienen una misma

productividad del agua. Sin embargo, unas cuotas específicas por cultivo, con las cuales se igualen los lucros cesantes de los regantes, repercutirá unas menores pérdidas económicas para la comunidad en su conjunto, si el grupo es heterogéneo (diferente productividad). Pero aún así, esta política puede tener efectos muy diferentes en los agricultores, sobre todo cuando hay diferencias sustanciales en su producción y beneficios. Esto puede desmerecer el objetivo de lograr una cierta equidad en la asignación del agua. En zonas en donde hay poca variedad de cultivos y rendimientos, hacer que la pérdida de beneficios absolutos sea la misma podría ser suficiente; pero cuando no es así, es preferible considerar una misma pérdida relativa, definida como un porcentaje del beneficio inicial.

5.1.2.1. Obtención de funciones de beneficio del agua

La información disponible nos permite afirmar que es conveniente completarla y adaptarla, con el fin de facilitar la obtención de funciones de beneficio en relación con el agua que es aplicada. Los resultados del modelo que aquí se propone serán tanto más fiables, cuanto que estas funciones sean definidas con mayor precisión para cada explotación. En los trabajos en los que los rendimientos marginales de los cultivos se relacionan con las cantidades de agua aplicadas, se suele seleccionar un número limitado de explotaciones, que se clasifican en grupos homogéneos, según su respuesta al agua. Los trabajos de modelización a nivel de explotación por lo general consideran relaciones dosis-respuesta de tipo Leontief, o toman los rendimientos medios de una serie temporal. Otra opción es construir funciones de producción, mediante simuladores biofísicos de crecimiento de los cultivos, como se ha hecho en Goetz *et al* (2005). En relación con esta última opción, AquaCrop es un modelo de la FAO que permite simular el rendimiento de los cultivos en respuesta al riego, en una ubicación determinada y bajo diversos escenarios climáticos (FAO , 2014a).

A continuación haremos referencia explícita a una manera sencilla de determinar las funciones de beneficio en respuesta al agua aplicada, disponiendo de un muy reducido número de datos; si bien es preferible obtenerlas por regresión, con un número mayor de datos, con objeto de ganar en representatividad. En concreto, para cada cultivo o explotación en una determinada zona regable, hemos de identificar su función de beneficio marginal privado, a la que llamaremos BM , la cual representa el beneficio marginal o variación del beneficio al modificar en una unidad el agua aplicada, q ; o, alternativamente, su integral o beneficio privado, B . Teniendo en cuenta el beneficio obtenible sin riego, B_s , en secano, el cual podría tomar valores

negativos, podemos restar éste al anterior, definiendo una nueva función: $BR = B - B_s$. Esta función representa el beneficio adicional que se obtiene por aplicar una dotación de agua q .

En caso de restricción, la asignación de cada regante, q , será menor o igual que la dotación de referencia, sin restricciones, q_r , la cual debe estar en correspondencia con las necesidades del cultivo para obtener el beneficio máximo. De este modo, para q_r se obtendría el beneficio máximo, BR_r , y este punto (q_r, BR_r) será tomado como punto de referencia. Aunque otras formulaciones pueden tener cabida, para mayor simplicidad en la exposición, manejaremos de momento funciones de beneficio cuadráticas, del tipo:

$$BR(q) = B - B_s = \frac{m}{2} \cdot q^2 + a \cdot q \quad | \quad q \geq 0, \quad m < 0, \quad a > 0 \quad (17)$$

$$BM = \frac{dB}{dq} = \frac{dBR}{dq} = m \cdot q + a \quad (18)$$

Estas expresiones suponen que interesará regar, si el beneficio marginal derivado de la aplicación del agua, BM , es mayor que cero. Su valor es decreciente conforme aumenta el agua aplicada. Para ello, el coeficiente a debe ser positivo y el coeficiente m negativo. Obsérvese que la condición de punto doble, máximo matemático, del punto de referencia, (q_r, BR_r) , hace que únicamente con éste se puedan conocer los dos parámetros, y con ello las funciones:

$$\left. \begin{array}{l} BM_r = 0 = m \cdot q_r + a \\ BR_r = B_r - B_s = \frac{m}{2} \cdot q_r^2 + a \cdot q_r \end{array} \right| \rightarrow m = \frac{-2 \cdot BR_r}{q_r^2}, \quad a = \frac{2 \cdot BR_r}{q_r} \quad (19)$$

Podemos introducir ahora una relación, q^* , que expresa la fracción sobre el volumen de referencia que sea aplicada bajo una restricción de agua: $q^* = q / q_r$. Esta relación -en tanto por uno- tendrá su análoga para el incremento de beneficio obtenible con el riego, BR^* , con respecto a la situación de referencia. Operando con el valor obtenido para los dos parámetros a y m , bajo la condición de máximo matemático, las expresiones (17) y (18) se transforman en:

$$BR^* = \frac{BR}{BR_r} = \frac{2q}{q_r} - \left(\frac{q}{q_r} \right)^2 = 2q^* - q^{*2} \quad (20)$$

$$BM^* = \frac{BM}{BR_r / q_r} = \frac{dBR^*}{dq^*} = 2 \cdot (1 - q^*) \quad (21)$$

Válidas ambas para $0 \leq q^* = \frac{q}{q_r} \leq 1$

Es posible obtener también el beneficio de referencia BR_r , conociendo q_r y el beneficio BR_a para cualquiera asignación actual, $q_a < q_r$, ya que, conocido $q_a^* = q_a / q_r$, de acuerdo con la primera de las dos últimas expresiones, se obtiene:

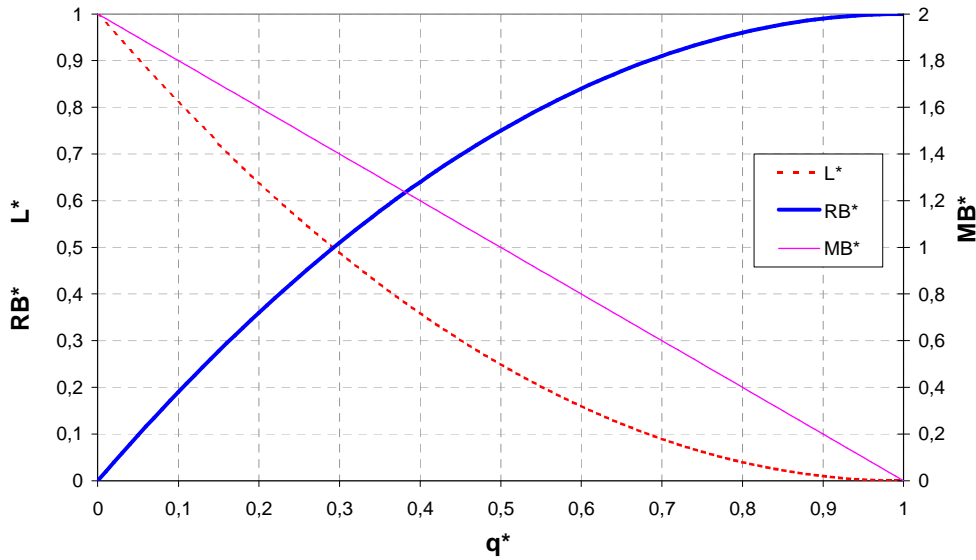
$$BR_r = \frac{BR_a}{2q_a^* - q_a^{*2}} \quad (22)$$

En ocasiones se hablará de disminución de beneficio o lucro cesante, L , con respecto a la situación de referencia, el cual vendrá dado por:

$$L = BR_r - BR = BR_r \cdot \left(1 - \frac{q}{q_r}\right)^2 \equiv L^* = \frac{L}{BR_r} = (1 - q^*)^2 \quad (23)$$

Las variables adimensionales BM^* , BR^* y L^* pueden seguir funciones muy diversas, tener coeficientes o valores de referencia significativamente diferentes, pero, en su forma adimensional, únicamente dependen de la variable q^* , y su representación es única, como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Ejemplo de función cuadrática de beneficio, BR^* , pérdidas, L^* , y beneficio marginal, BM^* , relativos a los de referencia, según la asignación relativa, q^*



Pueden coexistir, dentro de una misma comunidad de regantes, cultivos o explotaciones con tipos distintos de funciones de beneficio BR . Así mismo, podemos pensar en otros sectores que compitan por el agua con el regadío, sectores que podrían tener funciones BR muy distintas. En este sentido, las funciones potenciales ofrecen bastante versatilidad y pueden complementar bien a las cuadráticas. Para ellas, se tendría:

$$BR = B - B_s = c \cdot q^e \quad 0 \leq q \leq q_r \quad | \quad c > 0, 0 < e < 1 \quad (24)$$

$$BM = \frac{dB}{dq} = c \cdot e \cdot q^{e-1} \quad (25)$$

Así mismo, se supone que interesa regar si se consigue un beneficio marginal BM mayor que cero; y también que el beneficio marginal es decreciente con el aumento del agua aplicada. Por

ello, el coeficiente c y el exponente e serán mayores que cero, y este último será además menor que la unidad. El término independiente B_s representa el beneficio que se obtiene cuando no hay aporte alguno de agua, y puede tomar valores negativos.

Para determinar las funciones BR_r y BM_r serán necesarios dos puntos, uno sólo si se conoce el exponente e , supuesto éste que, para simplificar, será aquí considerado. En este caso, bastará con un único punto, que lógicamente también puede ser el punto de referencia de la situación sin escasez. En el caso de la función potencial, este punto (q_r, BR_r) no tendrá el carácter de máximo matemático. Conocido e y el punto de referencia, las expresiones (24) y (25) pueden escribirse como sigue:

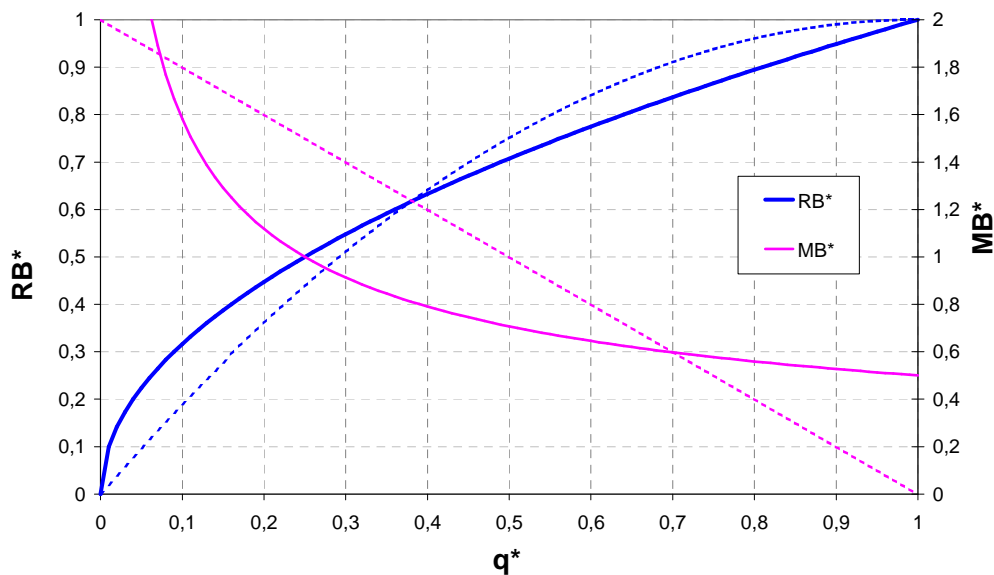
$$BR^* = \frac{BR}{BR_r} = q^{*e} \quad BM^* = \frac{BM}{BR_r / q_r} = e \cdot q^{*e-1} \quad (26)$$

Válidas ambas para $0 \leq q^* = \frac{q}{q_r} \leq 1$

La pérdida de beneficio que se deriva de aplicar una cantidad $q < q_r$, es decir, de reducir el riego en una fracción $q^* < 1$, será $L^* = \frac{L}{BR_r} = 1 - q^{*e}$.

En su forma adimensional, las tres funciones BM^* , BR^* y L^* son únicas para cada exponente e . En la figura 11 se muestran las curvas BM^* y BR^* asociadas a un $e = 0.50$, en comparación con sus análogos de la figura 10.

Figura 11. Función potencial de beneficio, BR^* , con exponente $e = 0.50$, y su marginal, BM^* (líneas continuas). Función cuadrática de beneficio y su marginal (líneas de puntos)



Diferentes exponentes e pueden ser usados. Obsérvese que con el valor extremo $e = 1$, la función BR^* sería la bisectriz del primer cuadrante; y que para el otro valor extremo, $e = 0$, sería la recta horizontal $BR^* = 1$.

5.1.2.2. Modelo de reasignación de dotaciones

a) *Con funciones cuadráticas*

En una comunidad de usuarios o en el conjunto de producciones de un mismo usuario, con sus correspondientes funciones definidas por los pares (q_{ri}, BR_{ri}) , una vez se haya establecido el criterio de reparto del agua, se tendrá una función representativa del beneficio agregado al agua que es aportada. En su forma adimensional, estas funciones de un conjunto de orientaciones productivas o de toda la comunidad, en función del criterio de reparto y de las diferencias dentro del conjunto, pueden ser iguales o ser algo diferentes a las individuales, representadas en las figuras anteriores.

Para referir en adelante las funciones agregadas de un conjunto o de una comunidad de regantes, se usarán las mismas variables pero en negrita, sin cursiva y con mayúsculas. De esta forma, \mathbf{Q}_R indica la asignación de referencia de toda la comunidad en condiciones de no escasez y \mathbf{Q} la asignación total de que dispone en un momento dado; \mathbf{BR}_R , el beneficio neto asociado al agua que obtendría la comunidad en condiciones de no escasez, y \mathbf{BR} el que le corresponderá a la asignación \mathbf{Q} . Lógicamente, este último beneficio agregado puede tomar distintos valores, dependiendo del reparto de agua que se haga. Las variables de la comunidad, en función de las de los distintos usuarios, serán entonces:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \sum q_i = \sum q_{ri} \cdot q_i^* & | & \mathbf{Q}_R = \sum q_{ri} \\ \mathbf{BR} &= \sum BR_i = \sum BR_{ri} \cdot (2q_i^* - q_i^{*2}) & | & \mathbf{BR}_R = \sum BR_{ri} \\ \mathbf{L} &= \sum L_i = \sum BR_{ri} \cdot (1 - q_i^*)^2 \end{aligned} \quad (27)$$

Reparto proporcional

La reducción porcentual de agua en un determinado año, con respecto al de no escasez, $\mathbf{Q}^* = \mathbf{Q}/\mathbf{Q}_R$, posibilita un reparto proporcional igual para todos los regantes: $q_i^* = \mathbf{Q}^*$. En consecuencia, según las expresiones (22) y (23):

$$BR = BR_R \cdot (2Q^* - Q^{*2}) \quad (28)$$

$$L = BR_R \cdot (1 - Q^*)^2 \quad (29)$$

Con esta opción, el lucro cesante, como pérdida relativa del beneficio ligado al agua, referido a la situación de referencia, sería el mismo para todos los regantes: $L^* = L_i / BR_{ri} = (1 - Q^*)^2$. Así, por ejemplo, un valor Q^* de 0.8 permitiría obtener un L^* de 0.04. Este lucro cesante puede resultar moderado, en comparación con la restricción de agua, por la particularidad del máximo. No obstante, si la situación frecuente fuese la de una asignación tal que $Q^* = 0.8$, y un año el Q^* se redujera a 0.60, implicaría que la pérdida relativa de beneficio, en tanto por uno, pasaría del 0.04 al 0.16. Por tanto, al alejarnos de la asignación máxima, las pérdidas económicas se acentúan.

Reparto óptimo

Alternativamente, puede buscarse un reparto más eficiente del agua, en el sentido de que se minimicen las pérdidas totales o que el beneficio agregado de la comunidad sea máximo. Es decir, establecer los q_i^* que hacen que L sea mínimo, con la restricción de que la suma de las dotaciones individuales asignadas no superen la cantidad total de agua disponible Q , para toda la comunidad de usuarios.

En la solución óptima, el beneficio marginal es igual para todos los que reciben asignación e igual al del conjunto. Así, para funciones de beneficio de tipo cuadrático, se tendría:

$$BM_i = \frac{BR_{ri}}{q_{ri}} \cdot 2 \cdot (1 - q_i^*) = \mathbf{BM} \quad \rightarrow \quad q_i^* = 1 - \frac{\mathbf{BM}}{2} \cdot \frac{q_{ri}}{BR_{ri}} \quad (30)$$

Para el valor de \mathbf{BM} que resulte, por tener que ser todas las asignaciones mayores o iguales a cero ($q_i > 0 \rightarrow q_i^* > 0$), se quedarán sin entrar en el reparto las orientaciones productivas que no cumplan que $2BR_{ri} / q_{ri} > \mathbf{BM}$. Por tanto, cuando se conozca \mathbf{BM} , el reparto óptimo, incorporando variables lógicas que toman valor unidad cuando son ciertas y valor nulo cuando son falsas, se obtendrá con:

$$q_i^* = \left(1 - \frac{\mathbf{BM}}{2} \cdot \frac{q_{ri}}{BR_{ri}} \right) \cdot \left(\frac{2BR_{ri}}{q_{ri}} > \mathbf{BM} \right) \quad (31)$$

Cada valor de \mathbf{BM} se corresponde, por tanto, con una disponibilidad Q , que puede determinarse sumando los valores asignados:

$$\mathbf{Q} = \sum q_{ri} \cdot q_i^* = \sum q_{ri} \cdot \left(1 - \frac{\mathbf{BM}}{2} \cdot \frac{q_{ri}}{BR_{ri}} \right) \cdot \left(\frac{2BR_{ri}}{q_{ri}} > \mathbf{BM} \right) \quad (32)$$

La determinación inversa, conocido \mathbf{Q} , determinar \mathbf{BM} , debe hacerse de forma iterativa. Así, de estimar un valor, \mathbf{BM}_e , se obtiene con (32) un valor, \mathbf{Q}_e , el cual será mayor o menor que \mathbf{Q} . De ser mayor, habrá que aumentar la estimación \mathbf{BM}_e ; de ser menor, habrá que reducirla, hasta que coincidan $\mathbf{Q}_e = \mathbf{Q}$.

Conocido finalmente \mathbf{BM} con (32), y el reparto de agua con (31), pueden obtenerse mediante (27) los beneficios o pérdidas de la comunidad. Y, con (17) y (18), aquéllos que son propios a cada orientación productiva.

La solución óptima es independiente de la situación de partida, y de que ésta sea o no óptima. Es decir, si se parte de una situación de escasez, \mathbf{Q}_A^* , con un reparto q_{ai}^* y con un beneficio \mathbf{BR}_A , el cual, con respecto a la situación de referencia, representa una pérdida total \mathbf{L}_A conocida, si se reduce o aumenta la asignación hasta \mathbf{Q}^* , la menor pérdida o ganancia de beneficio con respecto a la situación anterior produce un reparto que es el mismo que si se partiera de la situación de referencia.

En lo que se refiere a la incidencia en el reparto de los errores en la determinación de los parámetros o puntos de referencia, suponiendo que dichos errores no influyen en el valor de \mathbf{BM} marcado por la disponibilidad \mathbf{Q}^* , se tendría:

$$\frac{dq}{dq_r} = 2q^* - 1 \rightarrow dq^* = \frac{dq}{q_r} = \frac{dq_r}{q_r} \cdot (2q^* - 1) \quad (33)$$

$$\frac{dq}{dBR_r} = \frac{q_r}{BR_r} \cdot (1 - q^*) \rightarrow dq^* = \frac{dq}{q_r} = \frac{dBR_r}{BR_r} \cdot (1 - q^*) \quad (34)$$

Esto implicaría que un error en q_r con signo positivo, $dq_r > 0$, esto es, suponer más necesidades que las reales, implicaría recibir más agua, $dq > 0$, si $q^* > 0.5$. Pero, por el contrario, podría suponer recibir menos agua, $dq < 0$, si $q^* < 0.5$, situación esta última más probable en condiciones de escasez severa. A modo de ejemplo, un error positivo de un 20% en q_r ($dq_r/q_r = 0.2$), produciría para un $q^* = 0.75$ un error $dq^* = 0.10$; es decir, haría que se recibiese agua de más en un 10%. Por el contrario, para un año muy seco al que le correspondiera un $q^* = 0.25$, el mismo error haría que se recibiera un 10% menos.

Por el contrario, el error positivo en BR_r , $dBR_r > 0$, tendría como consecuencia recibir más agua, $dq > 0$; y un error negativo, recibir menos agua de la que correspondería sin errores. Obsérvese que la incidencia de este error sería más importante en los años con mayor escasez y en las orientaciones a las que, por ser menos productivas, les correspondiese menos agua. El mismo error positivo de $\pm 20\%$, ahora en BR_r y siendo $q^* = 0.75$, implicaría un error de $\pm 5\%$ en la asignación de agua; por el contrario, sería de un $\pm 15\%$, si $q^* = 0.25$.

b) Con funciones cuadráticas, potenciales o de otro tipo

Tratándose de funciones potenciales, el reparto, despejando de (26), sería:

$$q_j^* = \left(\frac{\mathbf{BM}}{e} \cdot \frac{q_{rj}}{BR_{rj}} \right)^{\frac{1}{e-1}} \quad (35)$$

Por comparación con lo visto para las funciones cuadráticas, con las funciones potenciales, a los usuarios nunca les corresponderá una asignación nula, puesto que q_j^* siempre será mayor que cero. Con las primeras funciones, las cuadráticas, ninguna orientación productiva obtenía la asignación de referencia en condiciones de escasez; por el contrario, con las potenciales, la expresión anterior podría dar valores mayores de la unidad, a los cuales lógicamente se les asignará el valor de referencia ($q^* = 1$). Esto les ocurrirá a todas las clases que tengan un valor de $e \cdot BR_r / q_r$ mayor que el beneficio marginal correspondiente. Es decir:

$$\mathbf{BM} \leq e \cdot \frac{BR_{rj}}{q_{rj}} \rightarrow q_j^* = 1 \quad (36)$$

Introduciendo variables lógicas, el reparto para un valor conocido de \mathbf{BM} puede ponerse como:

$$q_j^* = \left(\frac{\mathbf{BM}}{e} \cdot \frac{q_{rj}}{BR_{rj}} \right)^{\frac{1}{e-1}} \cdot \left(\mathbf{BM} > e \cdot \frac{BR_{rj}}{q_{rj}} \right) + \left(\mathbf{BM} \leq e \cdot \frac{BR_{rj}}{q_{rj}} \right) \quad (37)$$

De competir usuarios con funciones de beneficio de tipo cuadrático y potencial, al igualar los costes marginales para obtener el óptimo, se tendría:

$$BM_i = \frac{BR_{ri}}{q_{ri}} \cdot 2 \cdot (1 - q_i^*)^2 = BM_j = \frac{BR_{rj}}{q_{rj}} \cdot e \cdot q_j^{*e-1} = \mathbf{BM} \quad (38)$$

Por tanto, a cada \mathbf{BM} le corresponde un reparto, unos valores q_i y q_j , o una disponibilidad \mathbf{Q} , que puede calcularse de forma explícita. Como consecuencia, conocida la disponibilidad \mathbf{Q} , el valor \mathbf{BM} del óptimo puede calcularse resolviendo la siguiente expresión implícita:

$$\begin{aligned}
Q = & \sum q_{ri} \cdot \left(1 - \frac{\mathbf{BM}}{2} \cdot \frac{q_{ri}}{BR_{ri}} \right) \cdot \left(\frac{2BR_{ri}}{q_{ri}} > \mathbf{BM} \right) + \\
& + \sum q_{rj} \cdot \left[\left(\frac{\mathbf{BM}}{e_j} \cdot \frac{q_{rj}}{BR_{rj}} \right)^{\frac{1}{e_j-1}} \left(\mathbf{BM} > e_j \cdot \frac{BR_{rj}}{q_{rj}} \right) + \left(\mathbf{BM} \leq e_j \cdot \frac{BR_{rj}}{q_{rj}} \right) \right] \rightarrow \mathbf{BM} \quad (39)
\end{aligned}$$

Estimando un valor de **BM**, por la expresión (39) se puede calcular el valor correspondiente de **Q**. De no coincidir éste con la cantidad de agua disponible, hay que modificar la estimación: reduciendo **BM**, en caso de que **Q** resulte menor, o aumentándolo, en caso contrario, hasta su coincidencia. Actuando de forma similar, puede incluirse en el modelo de reparto óptimo otro tipo de funciones. Obsérvese que en la expresión (39) se ha extendido a funciones potenciales con distintos exponentes e .

5.1.3. Estudio de caso

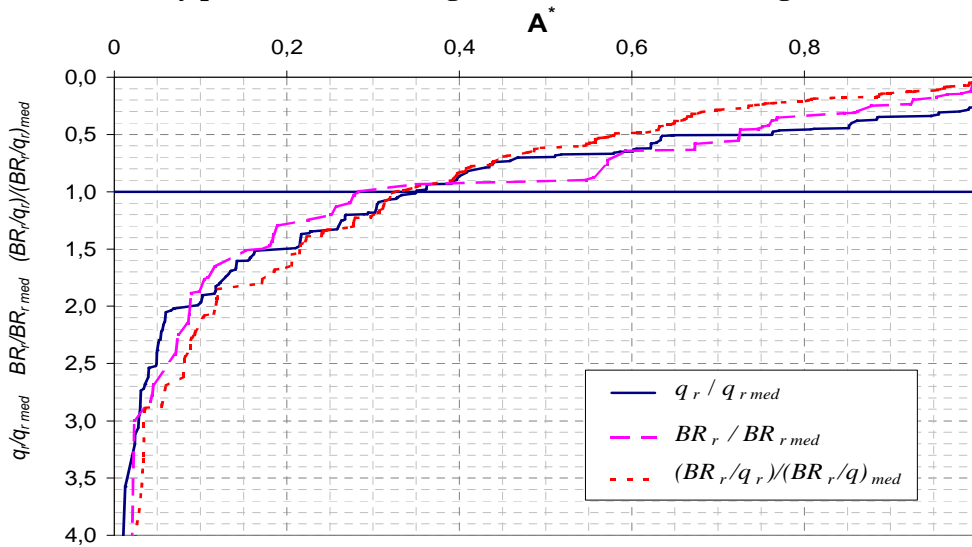
El siguiente es un ejemplo ficticio de aplicación del modelo previamente expuesto. Ha sido seleccionado para que resulte ilustrativo y pueda parecerse a un caso real. En el conjunto de explotaciones de una zona regable de $A_R = 9755$ ha, se han diferenciado $n = 207$ clases u orientaciones productivas, en función de los cultivos, del sistema de producción y de las condiciones específicas de los suelos. Para un determinado año, cada una de estas clases tendrá una superficie, a_i , una asignación, q_{ri} , y un beneficio de referencia, BR_{ri} . Para ese año, se desea estudiar el beneficio de toda la comunidad de regantes, **BR**, que se obtendría con una cierta disponibilidad de agua, $Q = 1.81 \text{ hm}^3$, la cual suponemos equivale al 50% de la asignación de referencia, en situación de no restricción. Para hacer esto, consideraremos el reparto óptimo que minimiza las pérdidas económicas totales, así como la regla de reducción proporcional.

Para cada cultivo, sistema de producción y ubicación, se puede obtener y se ha obtenido, en primer lugar, las necesidades de agua, con la ayuda de programas como el *CropWat* (ver FAO, 2014b). Así mismo, en función del método de riego y la programación de riegos, se puede estimar y se ha estimado el rendimiento de las aplicaciones y, por tanto, las necesidades brutas, las cuales han sido tomadas como dotaciones de referencia, q_r . Por otra parte, se dispone de unas estimaciones de producción por cultivo, ya sea para las dotaciones de referencia q_{ri} y/o para otras dotaciones conocidas q_a , además de unas previsiones de precios de venta y de costes. En consecuencia, se han obtenido unos beneficios, B_r o B_a , que, junto con los beneficios que se obtendrían sin aplicarse riego alguno, B_s , según lo ya indicado, permiten obtener los beneficios

de referencia en cada caso atribuibles al riego, BR_r . Éstos deberían ser aprobados por técnicos competentes y quedar disponibles para poder efectuar las previsiones de cada campaña.

En el ejemplo considerado, la asignación de referencia (sin restricciones) presenta un valor medio $q_{rmed} = Q_R/A_R = 3710 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, con unas variaciones muy importantes: un coeficiente de variación $CV_q = 0.81$. El beneficio de referencia debido al riego presenta un valor medio $BR_{rmed} = BR_R/A_R = 2005 \text{ € ha}^{-1}$, siendo sus variaciones también importantes: $CV_{BR} = 1.06$. Por su parte, la productividad del agua en la situación de referencia presenta un valor medio $BR_r/q_{rmed} = BR_R/Q_R = 0.54 \text{ € m}^{-3}$ y un coeficiente de variación de 1.24. En las tres distribuciones, los valores por debajo de la media tienen más representación superficial que los valores por encima de la media (ver figura 12).

Figura 12. Función de distribución, A^* , para los valores de referencia unitarios de asignación, beneficio y productividad del agua en la comunidad de regantes analizada

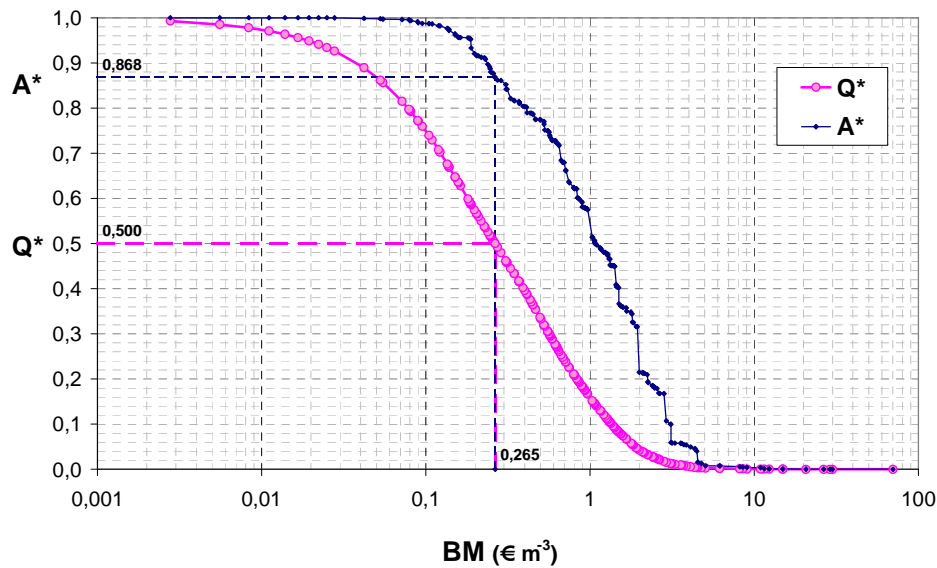


plm.1.4. Resultados y discusión

a) Con funciones de beneficio cuadráticas

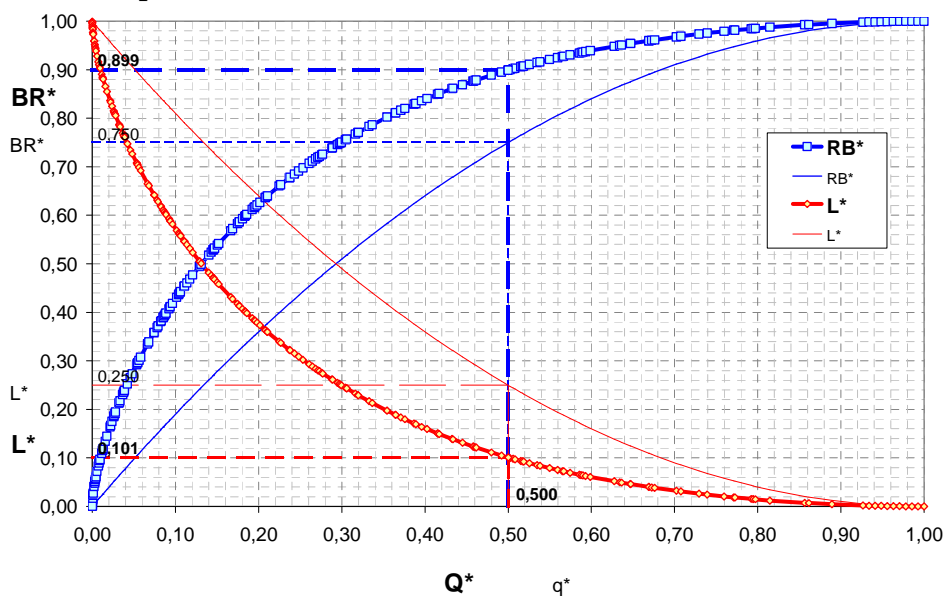
Aplicando el reparto óptimo, el beneficio marginal que obtiene la comunidad de regantes, BM , a partir de los volúmenes disponibles de agua, $Q^* = Q/Q_R = q_{med} / q_{rmed}$, se ha obtenido mediante la expresión (32). El resultado ha sido representado en la figura 13. Cuando la dotación es baja, puede resultar que una parte importante de la superficie se quede sin riego; el tanto por uno de superficie que sí sería regada, $A^* = A/A_R$, también ha sido representado.

Figura 13. Beneficio marginal de la comunidad, BM, en función del agua disponible, Q^* , y la superficie regada, A^* , con el reparto óptimo y funciones de beneficios individuales cuadráticas



Como se ha indicado, a cada Q^* le corresponde un reparto óptimo, q_i , el cual se determina mediante la expresión (31), a partir del valor **BM** correspondiente. Conocidos los q_i , es factible determinar las funciones de beneficio, **BR**, y de pérdidas, **L**, en toda la comunidad de regantes. Ambas funciones han sido representadas de forma adimensional, para así poderlas comparar con las que resultarían de un reparto proporcional (ver figura 14). Estas últimas coinciden con las funciones individuales, todas iguales, de BR_i y L_i .

Figura 14. Beneficios y pérdidas de la comunidad, BR^* y L^* , en función del agua disponible, Q^* , con el reparto óptimo (líneas gruesas) y con el reparto proporcional (líneas finas), para funciones de beneficios individuales cuadráticas

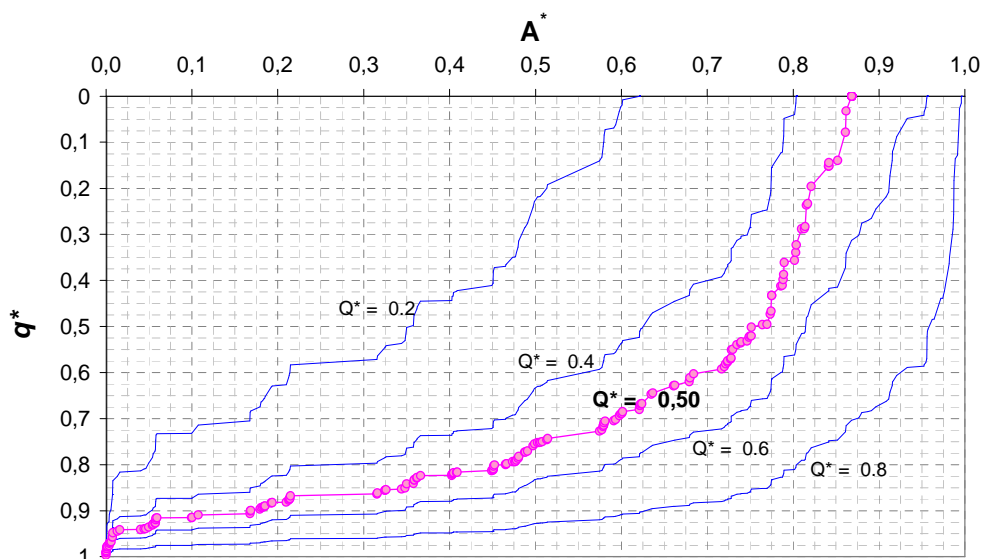


Nota: Con el reparto proporcional, la función de beneficio agregado de la comunidad coincide con las funciones de beneficios individuales cuadráticas (líneas finas).

Se observa que la comunidad, en situaciones de escasez, obtiene un mayor beneficio agregado mediante un reparto selectivo, por el cual se concede más agua a las orientaciones más productivas, que si se redujesen las dotaciones de forma proporcional a la disponibilidad. Para el ejemplo planteado, con $Q^* = 0.5$, el beneficio **BR** que resulta es el 90% del beneficio máximo o de referencia, frente al 75% que se obtendría con un reparto proporcional (ver figura 14). De las 207 clases consideradas, con el reparto óptimo se quedarían 43 sin asignación, lo que supone una superficie sin riego de $1-A^* \cong 13\%$ (ver figura 13). En ambas gráficas pueden obtenerse los resultados correspondientes a otros valores de Q^* . De este modo, la comunidad podría hacerse una idea clara de las repercusiones económicas de la falta de agua. Y los agricultores, de forma individual, podrían conocer la asignación que correspondería a cada orientación productiva, en función de las previsiones de agua; y, con ello, planificar su producción.

En la figura 15 se representa la fracción de superficie que se deja con riego, A^* , en relación con las dotaciones relativas, q^* , de las 207 clases u orientaciones productivas, para distintas disponibilidades relativas de agua en la comunidad, Q^* . Recordemos que q^* representa a las correspondientes fracciones de las respectivas dotaciones de referencia.

Figura 15. Fracción de superficie regada, A^* , en relación con las asignaciones relativas, q^* , para distintas disponibilidades de agua, Q^* (0.2, 0.4, 0.5, 0.6 y 0.8), con el reparto óptimo y funciones de beneficios individuales cuadráticas



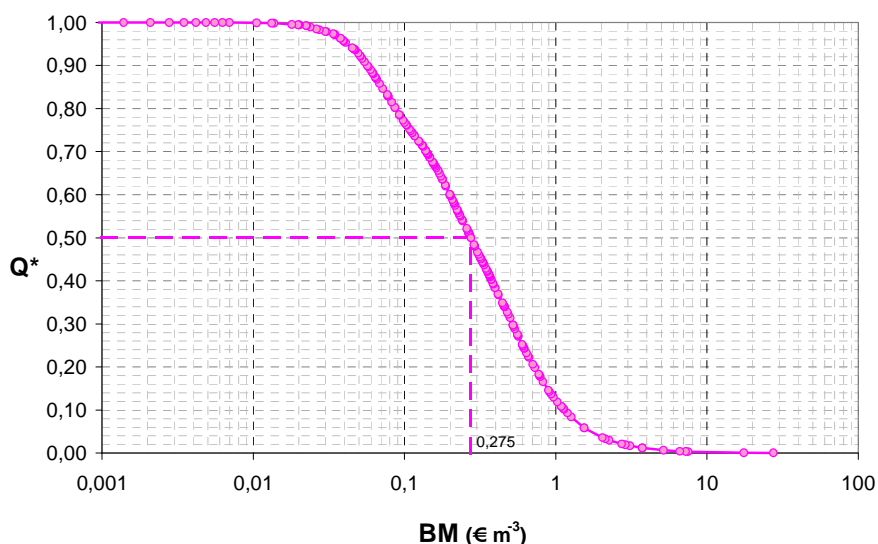
Con el reparto proporcional, con una disponibilidad $Q^* = 0.5$, todas las clases verían reducida su asignación a $q_i^* = 0.5$. Sin embargo, con el reparto óptimo se observa un importante traspaso de agua de las orientaciones menos productivas a las más productivas: cuanto menor es BR_i/q_i ,

menor asignación relativa q^* se recibe. Así, con $Q^* = 0.5$, en la comunidad analizada, aproximadamente el 70% de su superficie recibe más agua que la que le correspondería con el reparto proporcional; a costa del otro 30%, que percibiría menos asignación que con el reparto proporcional, y, sobre todo, a costa de un 13% de la superficie que no recibiría agua. Se recuerda que las diferencias entre el reparto proporcional y el óptimo se reducen cuanto menor es la variabilidad de las clases diferenciadas, siendo considerable la variabilidad del ejemplo estudiado.

b) Con funciones de beneficio potenciales

Se analizará ahora lo que ocurriría si las funciones de beneficio fuesen potenciales, con un exponente $e = 0.5$, y pasasen por el punto de referencia (q_{ri}, BR_{ri}) , obtenido y usado en las funciones cuadráticas. La forma distinta de estas curvas (ver figura 11) determina, como se ha explicado, que ahora no se quede ningún regante sin dotación y que haya un grupo de orientaciones productivas que reciban la misma cantidad que recibirían sin restricción. La relación entre la disponibilidad relativa de agua y el beneficio marginal resultante se representa en la figura 16.

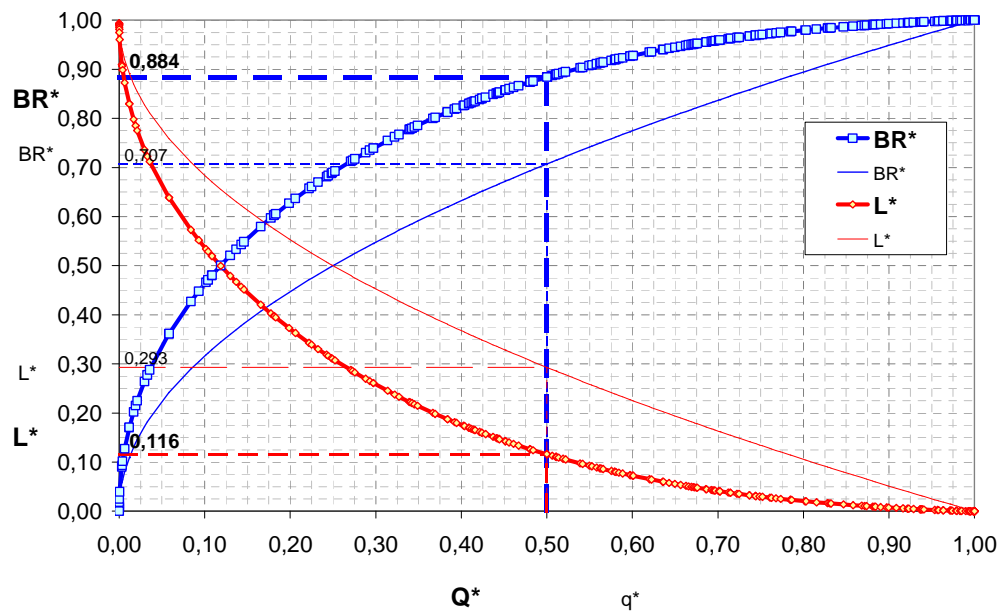
Figura 16. Beneficio marginal de la comunidad, BM, en función de la disponibilidad relativa de agua, Q^* , con el reparto óptimo y funciones de beneficios individuales potenciales



Las funciones potenciales de beneficio y pérdidas relativos a la situación de referencia, BR^* y L^* , según el agua disponible, Q^* , se representan en la figura 17. En su forma adimensional, se pueden comparar con las correspondientes funciones que resultarían de un reparto proporcional, las cuales representan también a las funciones individuales, todas iguales.

Nuevamente, se observa que la comunidad, en situaciones de escasez, obtiene un beneficio agregado significativamente mayor mediante el reparto óptimo que con la regla proporcional. Las diferencias entre uno y otro se reducen cuanto menor es la variabilidad de las orientaciones productivas. Pero, a diferencia del caso anterior, con funciones de beneficio potenciales ninguna clase se queda sin agua (ver figura 18).

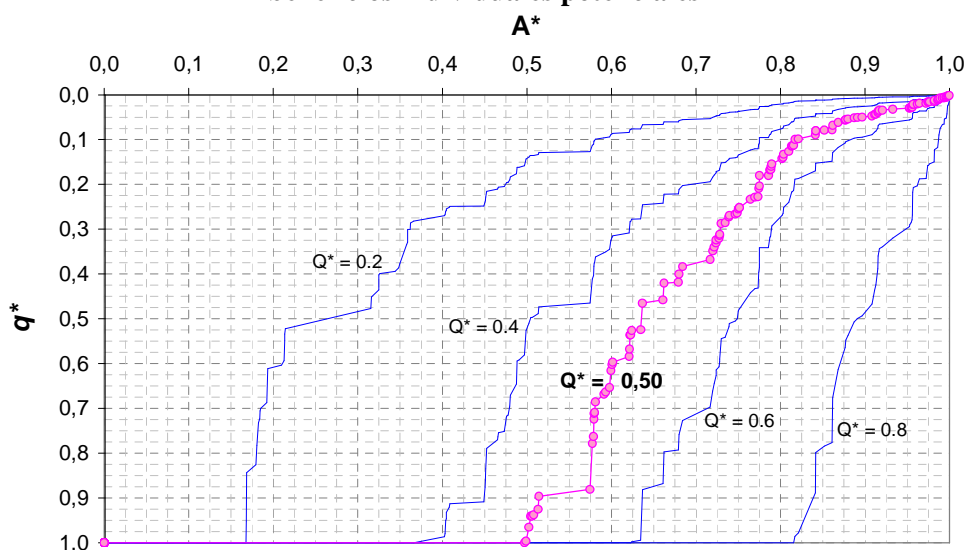
Figura 17. Beneficios y pérdidas de la comunidad, BR^* y L^* , en función del agua disponible, Q^* , con el reparto óptimo (líneas gruesas) y con el reparto proporcional (líneas finas), para funciones de beneficios individuales potenciales



Nota: Con el reparto proporcional, la función de beneficio agregado de la comunidad coincide con las funciones de beneficios individuales cuadráticas (líneas finas).

Por último, en la figura 18 se relacionan las dotaciones relativas de las diversas orientaciones productivas, q^* , con la fracción de superficie total regada, para distintas disponibilidades de agua en la comunidad, Q^* . Se observa en estas funciones una distinta curvatura con respecto a las obtenidas en la análoga figura 15, para funciones cuadráticas.

Figura 18. Fracción de superficie regada, A^* , en relación con las dotaciones relativas, q^* , para distintas disponibilidades de agua, Q^* (0.2, 0.4, 0.5, 0.6 y 0.8), con el reparto óptimo y funciones de beneficios individuales potenciales



Por comparación con el reparto proporcional (con $Q^* = 0.5$, todos recibirían $q_i^* = 0.5$), en el reparto óptimo se observa un importante traspaso de las orientaciones menos productivas a las más productivas. Así, para la comunidad analizada, con un $Q^* = 0.5$, aproximadamente el 63% de la superficie recibe más agua que la que le correspondería con el reparto proporcional, a costa del 37% de la superficie restante, a la cual le correspondería una menor asignación. Sorprende que prácticamente un 50% de la superficie no tendría reducción de dotación, lo cual implica que, en este caso, las clases menos productivas tienen un consumo de agua por unidad de superficie considerablemente mayor que las más productivas.

5.1.5. Conclusiones

En este trabajo se presenta un método para determinar la asignación de dotaciones de agua de riego con el criterio de máximo beneficio, el cual puede resultar significativamente más interesante que el método proporcional o la imposición de cuotas únicas e indiscriminadas, cuando la heterogeneidad de cultivos es importante. El uso de variables adimensionales permite mostrar y, con ello, sintetizar el comportamiento económico de una comunidad de regantes según sea la disponibilidad de agua, lo que puede tener interés en la gestión de la misma, en todos los temas relacionados con este recurso. La aplicación numérica, aunque muy concreta, ilustra sobre el método y sobre su posible utilidad y repercusiones. Se concluye, en este sentido, que tiene gran interés llevar a la práctica métodos inspirados en los mismos principios.

El método propuesto puede ser empleado tanto para realizar el reparto económicamente óptimo de agua en una comunidad, como en las distintas explotaciones de un único agricultor. En una agricultura competitiva, un usuario puede tener muy diversas orientaciones productivas; y lo que le interesará en una situación de escasez no será el reparto proporcional en cada una de ellas, sino aquel reparto que le produzca el máximo beneficio. En una comunidad de regantes las diferencias serán todavía más acusadas y, como consecuencia, éstos serán capaces de entender que, si unidos obtienen menos pérdidas, les puede interesar trabajar conjuntamente, estableciendo sus correspondientes contrapartidas, aunque esto entrañe algunas dificultades.

La aplicación del método de reparto óptimo a una comunidad de regantes permite además prever las parcelas que se podrían quedar sin riego, debido a su baja rentabilidad. Esta información sería de gran interés, pues permitiría planificar las explotaciones y los regadíos. Una vez efectuada la reasignación de derechos ante una situación de escasez, cabe pensar que la introducción de un mercado contribuya a incrementar aún más la eficiencia económica en el uso del agua. En este sentido, la curva de beneficio marginal y, en particular, el valor resultante de las pérdidas económicas en cada caso, puede servir de referencia para establecer el precio del agua en las transacciones, además de para estudiar posibles vías para incrementar los recursos hídricos.

Hay dos salvedades que hacer. La primera tiene que ver con el efecto secundario o inducido que provocaría la aplicación de este tipo de reglas de reparto. Cabe suponer que si el tipo de cultivo y su rendimiento influyen en la cantidad de agua que recibe un agricultor, es posible que éste haga por cambiarlos; pero también, y en atención a la regla de asignación, es probable que intente mejorar su eficiencia productiva. En segundo lugar, el instrumento propuesto, al igual que los de tarificación y mercado, requiere información detallada de cada productor. No obstante, tratándose sólo de los cultivos que ya se siembran, la aplicación no debería presentar dificultades técnicas.

En general, la información necesaria para desarrollar el método del reparto óptimo no es muy difícil de obtener, si bien, para una aplicación práctica, sería necesaria su constante actualización y perfeccionamiento, con objeto de que fuese lo más representativa posible. Debería establecerse un procedimiento consensuado y controlado para obtener dicha información y los parámetros básicos del método, con objeto de evitar en lo posible conflictos

entre los usuarios, por sentirse más perjudicados o menos favorecidos. Toda esta información, aunque tuviese que particularizarse y mejorarse cada año, sería de gran interés, porque permitiría evaluar mejor el coste de la escasez y, con ello, analizar si compensa acometer soluciones alternativas. En definitiva, si dicha información y el método propuesto permiten ser más competitivos, debería promoverse su uso. De ahí que consideremos que deba explorarse más a fondo, pues presenta buenas propiedades teóricas.

5.2. COMPARACIÓN DE CINCO REGLAS DE ASIGNACIÓN DISEÑADAS A PARTIR DE LAS FUNCIONES DE BENEFICIO DE LOS CULTIVOS

Artículo “Managing irrigation water shortages: A comparison between five allocation rules built on crop benefit functions”. *Water Resources Management* (2014) Volume 28, Issue 8: 2315-2329.

Autores: Javier Alarcón, Alberto Garrido y Luis Juana.

5.2.1. Introducción

Hablando de escasez de agua, es a sus aspectos físicos a los que probablemente se haya prestado más atención, incluyendo la incertidumbre de la disponibilidad de recursos a largo plazo (p.e., Safa *et al*, 2012); pero algunos autores se han fijado también en cuestiones políticas y sociales (p.e., Mehta, 2005a y Metha, 2005b). Para intentar estimar los beneficios de los diferentes usos del agua, es esencial desarrollar métodos que sean capaces de integrar sus diferentes atributos de valor. Estos métodos deben considerar los enfoques posibles en el reparto del agua, cuando hay una serie de demandas e inseguridad en el suministro (Hughes y Mallory, 2009).

Molle (2009) concluye que el sistema de asignaciones es preferido a los instrumentos puramente económicos para gestionar la escasez de agua, ya que es más equitativo, transparente y eficaz para salvar los desequilibrios entre la oferta y demanda. Este autor sostiene que la asignación de derechos o cuotas repercute unas pérdidas globales de beneficio más limitadas que los sistemas de precios. En contraste con la abundante literatura teórica en donde se presenta la tarificación del agua como herramienta clave para gestionar su demanda, parece que los precios se utilizan sobre todo para regular el uso en situaciones límite, más que para racionar unos recursos escasos. De esta manera, se han propuesto las tarifas volumétricas por bloques escalonados de consumo, dando pie a la imposición de sanciones eficientes al consumo excesivo (ver epígrafe 4.2.2). No obstante, los sistemas de asignación se han puesto también en entredicho, por no ser lo suficientemente flexibles como para adaptarse a unas condiciones cambiantes y por estar supeditados a un costoso control o medición de consumos (Dinar *et al* 1997; Rogers *et al*, 2002; Molle, 2009).

En la mayoría de los países áridos y semiáridos la gestión de los recursos hídricos se ha ido dejando en manos de los gobiernos, a través de unos derechos o unas licencias de uso (Burchi, 2004). La justificación de estos derechos, y la de las reglas para su asignación, es facilitar un reparto eficiente del agua con el cual equilibrar la oferta y la demanda, y también satisfacer algunos criterios de equidad predeterminados. Como componentes esenciales de la asignación y la planificación de recursos hídricos, se introducen límites de uso en tiempo real. La evaluación de cualquier reparto de agua entre los usos posibles no sólo debe tener en cuenta el "valor" de la demanda normal, sino también el impacto de las restricciones, bajo diferentes niveles de garantía en el suministro (Hughes y Mallory, 2009). Por lo tanto, la asignación de derechos es un medio básico para facilitar una gestión eficiente del agua en situaciones de sequía (Lorenzo-Lacruz *et al*, 2013), y un requisito previo para garantizar que los mercados de agua funcionan debidamente.

Sudáfrica, a la vanguardia de las reformas globales y única en su énfasis por la igualdad social, proporciona un ejemplo interesante que explorar (ver Movik, 2011, y Turton, 2013). Con el fin de facilitar la reasignación de recursos en aquellas cuencas con escasez de agua, se impuso la obligación de adquirir licencias o derechos a los usos actuales, pudiéndose otorgar nuevas licencias según criterios de equidad y eficiencia (Movik, 2011). En España, el sistema de reparto descansa en buena medida en el orden de prioridad de usos establecido en la Ley o en la normativa de planificación vigente, y, a un menor nivel, en los acuerdos de las comisiones de sequía y de desembalses. En las comunidades de regantes, el agua se reparte proporcionalmente, aunque aquellos usos considerados sociales a menudo tienen preferencia, porque de ellos dependen más puestos de trabajo (Calatrava y Garrido, 2006). La reasignación se articula en las transacciones de derechos al uso del agua (ver, p.e., Garrido *et al*, 2012), ya sea mediante intercambios voluntarios en mercados de agua o a través de acciones colectivas promovidas en el ámbito de las cuencas hidrográficas o de las comunidades de regantes.

Es en situaciones de escasez cuando cobra especial trascendencia la capacidad de las reglas de asignación para garantizar que el uso del agua alcance un óptimo social o económico. Esta afirmación, aunque pueda parecer en principio obvia, surge de la consideración de unas particulares dinámicas sociales y ecológicas, que son las que han de determinar esa solución óptima (Møvik, 2011). Molle (2009) señala que, si los derechos se pueden transferir, pueden ser fácilmente reasignados entre los usuarios, siguiendo criterios de eficiencia económica. La *eficiencia* económica, definida como la asignación que genera el mayor beneficio que puede

obtenerse de los recursos disponibles, es un criterio común que se utiliza en la asignación de recursos escasos. Esta maximización se consigue igualando los beneficios marginales de todos los usuarios (p.e., Dinar *et al*, 1997). Hacer esto en la práctica es difícil, debido a la falta de información, a unas políticas desacertadas o a un funcionamiento inadecuado de las instituciones (Easter *et al* 1997; Thobani, 1997; Tsur y Dinar, 1997; Spulber y Sabbaghi, 1998).

Sin embargo, tratándose de recursos comunes y esenciales, como el agua, cuyo buen uso debería beneficiar a la sociedad en general, el criterio de eficiencia por sí solo puede no ser suficiente para su reparto óptimo. La *equidad* debería ser así mismo tenida en cuenta, como reflejo de los valores sociales que influyen en que un reparto entre grupos económicamente desiguales sea ‘justo’ (Seagraves y Easter, 1983; Dinar y Subramanian, 1997). Las reglas de asignación invitan a considerar cuestiones de eficiencia, equidad y transparencia en el reparto del agua (Wichelns, 1999; Johansson *et al*, 2002). Así, la reserva de derechos previamente adquiridos puede ser el mecanismo preferido en aquellas explotaciones para las cuales una subida en el precio del agua haga que dejen de ser rentables (p.e., Bandaragoda, 1998). Haciendo que los derechos sean transferibles, se fomenta aún más que ese reparto sea eficiente y equitativo (Seagraves y Easter, 1983; Wichelns *et al*, 1996; Dinar *et al*, 1998).

El objetivo de este trabajo es analizar cinco reglas alternativas de asignación del agua de riego. Su eficiencia se mide con la suma de las pérdidas de beneficio de todos los regantes, como consecuencia de disponer de una menor cantidad de agua dentro de una misma zona regable. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las comunidades de regantes son organizaciones cuyos miembros comparten objetivos comunes, pero que rara vez funcionan como empresas privadas. Por lo tanto, la eficiencia económica puede no ser su único propósito. Otro de los objetivos de este trabajo es poner de relieve la información que se precisa para determinar el reparto de agua más eficiente. En particular, se propone y utiliza un método simple para estimar el beneficio derivado del riego, cuando no se tiene una información más precisa.

5.2.2. Métodos

Son relativamente abundantes los modelos diseñados para distribuir el agua de riego con el propósito de maximizar el beneficio económico de un colectivo (Reca *et al*, 2001; Shangguan *et al*, 2002; Benli y Kodali, 2003; Letcher *et al*, 2004; Ortega *et al*, 2004; Babel *et al*, 2005; o

Jin *et al*, 2012). La asignación óptima del agua ha sido también estudiada por aplicación de la teoría de juegos (Sechi *et al*, 2013) y con técnicas de “programación borrosa” (*fuzzy programming*: Lu *et al*, 2009; Wang y Huang, 2012; y *fuzzy cooperative games*: Sadegh y Kerachian, 2011).

El coste que supone a los regantes una restricción de agua puede ser deducido a partir de sus funciones de beneficio marginal (*BM*). Pueden encontrarse varios ejemplos de estimación del valor marginal del agua de riego (Moriana *et al*, 2003; Young, 2005; o Mesa-Jurado *et al*, 2010). Las funciones de beneficio obtenidas empíricamente reflejan la destreza de los agricultores, las condiciones naturales, el capital invertido y la capacidad productiva en general de una cierta comunidad, la cual puede estar lejos del óptimo técnico y económico. En la práctica, cuando no se dispone de funciones de producción, éstas pueden ser estimadas haciendo uso de una aplicación informática específica, como *CropSyst* y *AquaCrop* de la FAO. Su estimación es también posible mediante simuladores biofísicos de crecimiento de los cultivos (p.e. Goetz *et al*, 2005).

5.2.2.1. Estimación de funciones de beneficio del agua

Para aquellos casos en los que no se dispone de información de campo con la que poder efectuar un análisis econométrico, proponemos seguidamente un método que requiere muy pocos datos. En una determinada zona regable, B representa el beneficio económico que puede obtenerse de un cierto cultivo. Restando al anterior el beneficio que puede alcanzarse sin riego alguno, B_s , obtenemos el beneficio adicional que se obtiene por el hecho de aplicar una cierta dotación de agua q : $BR(q) = B - B_s$. El beneficio marginal, BM , es la variación de beneficio que resulta de aumentar q en una unidad: $BM(q) = \partial B / \partial q$.

Dentro de una misma zona regable, puede haber cultivos con diferentes funciones de beneficio. Lo que es más, podría haber otros sectores o actividades que compitieran con el regadío, para satisfacer sus propias demandas de agua, los cuales tendrían unas funciones de beneficio muy diferentes. Aunque podrían manejarse otras funciones, buscando una mayor simplicidad, emplearemos las funciones cuadráticas del tipo expresado en el capítulo 5.1, que recordamos:

$$BR(q) = B - B_s = \frac{m}{2} \cdot q^2 + a \cdot q \quad | \quad q \geq 0, m < 0, a > 0 \quad (17)$$

$$MB = \frac{dB}{dq} = \frac{dBR}{dq} = m \cdot q + a \quad (18)$$

Con este simple planteamiento, está claro que será de interés regar si $BM > 0$, aún cuando su valor disminuya a medida que se aplica más agua (porque $m < 0$).

En caso de restricción, la asignación de cada regante, q , será menor o igual que la *asignación de referencia*, sin restricciones, q_r , con la cual se satisfagan las necesidades del cultivo como para poder obtener el máximo beneficio, B_r . De este modo, el beneficio estrictamente atribuible al riego será $BR_r = B_r - B_s$. El punto que define dicho máximo (q_r , BR_r) será tomado como punto de referencia. Obsérvese que la condición de máximo matemático para este punto permite determinar fácilmente los dos coeficientes m y a :

$$\left. \begin{aligned} BM_r &= 0 = m \cdot q_r + a \\ BR_r &= B_r - B_s = \frac{m}{2} \cdot q_r^2 + a \cdot q_r \end{aligned} \right| \rightarrow m = \frac{-2 \cdot BR_r}{q_r^2}, \quad a = \frac{2 \cdot BR_r}{q_r} \quad (19)$$

Así pues, y como se vio en 5.1, con estos valores de referencia, q_r y BR_r , para una disponibilidad de agua dada, referida como $q^* = q/q_r$, las ecuaciones (17) y (18) pueden escribirse:

$$BR = BR_r \cdot \left(\frac{2q}{q_r} - \left(\frac{q}{q_r} \right)^2 \right) = BR_r \cdot (2q^* - q^{*2}) \quad (20)$$

$$BM = \frac{BR_r}{q_r} \cdot 2 \cdot (1 - q^*) \quad (21)$$

La correspondiente pérdida económica o lucro cesante, L , que se deriva de una menor disponibilidad de agua, $q^* < 1$, se obtendrá de la expresión (23), dada también en 5.1:

$$L = B_r - B = BR_r - BR = BR_r \cdot (1 - q^*)^2 \quad (23)$$

5.2.2.2. Reglas de (re)asignación a estudiar

Las directrices básicas para asignar el agua de riego llevan a las cinco reglas siguientes: *Regla 1*: Una asignación uniforme o indiferenciada por hectárea; *Regla 2*: Reducciones de agua proporcionales a los consumos de referencia; *Regla 3*: Diferentes reducciones, según los cultivos, de modo que se igualen las pérdidas absolutas de beneficio por hectárea; *Regla 4*:

Diferentes reducciones, de forma que las pérdidas relativas a los beneficios de referencia por hectárea sean iguales; *Regla 5*: Diferentes reducciones, de manera que se minimice la suma de las pérdidas económicas de todos los regantes de una misma comunidad.

5.2.3. Análisis

Consideremos una zona regable en donde se dan varios cultivos y/o variedades; o en la que, aún dándose un mismo cultivo y variedad, los rendimientos que se obtienen en respuesta al riego son diferentes, a razón de las diferencias existentes en las técnicas de producción, en la capacidad de los agricultores, en los suelos, la orografía, la radiación recibida o cualquier otro factor significativo, ya sea técnico o ambiental. En una situación como ésta, habrá tantas funciones de beneficio como combinaciones de variedades de cultivo y agricultores.

Para un cierto cultivo i , el porcentaje de agua disponible en una campaña de riego, con respecto al volumen de referencia con el cual se alcanzaría, para este cultivo, el beneficio máximo, se ha expresado como $q_i^* = q_i/q_{ri}$. Cuando nos refiramos a una comunidad de riego, emplearemos letras mayúsculas en negrita. Por lo tanto, la disponibilidad porcentual de agua en un año en particular, con respecto al año en que no haya restricciones, la escribiremos como $Q^* = Q/Q_r$.

Regla 1: Asignar una misma dotación

Los agricultores asumen una misma dotación, independientemente de los cultivos que rieguen: $q_i = q = Q/n$. Su pérdida de beneficio será desigual, a no ser que tengan idénticas funciones de beneficio marginal. La restricción relativa a la disponibilidad de agua será:

$$\sum_{i=1}^n q_i \leq Q \quad \left| \quad q_i = q \rightarrow q \leq \frac{Q}{n} \right. \quad (40)$$

La otra restricción que debe ser tenida en cuenta es que no se sobrepasen las asignaciones de referencia específicas por cultivo: $q_i \leq q_{ri}$. En aquellas parcelas en las que las dotaciones iniciales estén por debajo de la nueva asignación, no será exigible reducción alguna de agua. Siempre y cuando no sea necesario aumentar esas dotaciones iniciales, esta situación da lugar a una revisión de las asignaciones, con el fin de ajustar, en un proceso iterativo, el volumen total suministrado al volumen disponible, de un modo tal que las asignaciones finales no serán iguales para todos los cultivos. Así pues, incorporando variables lógicas, que toman el valor 1 cuando son verdaderas y 0 cuando son falsas, la iteración queda definida por

$$q = \frac{Q}{n} \rightarrow q_i = q \cdot (q \leq q_{ri}) + q_{ri} \cdot (q > q_{ri}) \rightarrow q = q + \frac{Q - \sum q_i}{n} \xrightarrow{Q \equiv \sum q_i} q_i \quad (41)$$

\uparrow $Q > \sum q_i$

Según esto, en el caso de emplear funciones de beneficio cuadráticas, la pérdida de beneficio o el lucro cesante para cualquier cultivo i será $L_i = BR_{ri} - BR_i = BR_{ri} \cdot (1 - q_i^*)^2$.

Obviamente, la aplicación de esta Regla 1 a un grupo que comparte una misma función de beneficio y una misma asignación inicial, conduce a la misma pérdida económica por hectárea para todos sus miembros. Lo que es más, bajo este improbable escenario, las cinco reglas que aquí estudiamos darán lugar a las mismas reasignaciones, así como a la misma pérdida de beneficio individual. En consecuencia, no es necesario desarrollar este caso.

Regla 2: Reducir dotaciones proporcionalmente

Mediante esta regla, se aplica a la dotación de referencia de cada uno de los cultivos y hectáreas, una reducción equivalente a la escasez de agua en la comunidad de regantes en cuestión: $q_i^* = q_i/q_{ri} = Q^* = Q/Q_r$. Según esto, empleando funciones de beneficio cuadráticas, la pérdida de beneficio de cualquier cultivo i vendrá dada por la expresión:

$$L_i = BR_{ri} - BR_i = BR_{ri} \cdot (1 - q_i^*)^2 = BR_{ri} \cdot (1 - Q^*)^2 \quad (42)$$

Regla 3: Igualar las pérdidas de beneficio por hectárea

Esta regla está pensada para comunidades en las que los cultivos, los factores de producción y los factores ambientales son bastante homogéneos, pues, de otro modo, daría lugar a pérdidas de beneficio bastante desiguales entre los regantes. El principio de la regla introduce la siguiente restricción:

$$L_i = L, \text{ sujeto a } \sum_{i=1}^n q_i \leq Q \text{ y } 0 \leq q_i \leq q_{ri} \quad (43)$$

Una vez conocido el volumen de agua a disposición de la comunidad de regantes, Q , puede inferirse el lucro cesante, L , igual para todos y cada uno de los cultivos i ; y con el mismo, cada asignación, q_i . Considerando funciones de beneficio cuadráticas:

$$L_i = BR_{ri} \cdot (1 - q_i^*)^2 = L \rightarrow \mathbf{Q} = \sum_{i=1}^n q_i = \sum_{i=1}^n q_{ri} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{L}{BR_{ri}}}\right) \cdot \left(1 > \sqrt{\frac{L}{BR_{ri}}}\right) \rightarrow L \rightarrow q_i \quad (44)$$

Por medio de la expresión (44), se puede calcular \mathbf{Q} , estimando previamente un valor de L . Si con esa estimación \mathbf{Q} resulta ser demasiado grande, habrá que reducir L ; en caso contrario, habrá que aumentarlo, hasta lograr la convergencia.

Regla 4: Igualar pérdidas relativas a los beneficios de referencia por hectárea

Con esta opción, se hace que las diferentes relaciones por cultivo i entre las pérdidas y los beneficios que podrían obtenerse con las respectivas asignaciones de referencia, sean las mismas para todos los cultivos de la comunidad: $L_i / B_{ri} = ct$. Obsérvese que, de considerar BR_r en vez de B_r llevaría a la Regla 2.

$$L_i^* = \frac{L_i}{BR_{ri} + B_{si}} = L^*, \text{ sujeto a } \sum_{i=1}^n q_i \leq \mathbf{Q} \text{ y } 0 \leq q_i \leq q_{ri} \quad (45)$$

Empleando funciones cuadráticas de beneficio, e introduciendo el parámetro $B_s^* = B_s / BR_r$, lo anterior conduce a la siguiente expresión:

$$L_i^* = \frac{(1 - q_i^*)^2}{1 + B_{si}^*} = L^* \rightarrow \mathbf{Q} = \sum_{i=1}^n q_i = \sum_{i=1}^n q_{ri} \cdot \left(1 - \sqrt{L^* \cdot (1 + B_{si}^*)}\right) \cdot \left(1 > \sqrt{L^* \cdot (1 + B_{si}^*)}\right) \rightarrow L^* \rightarrow q_i \quad (46)$$

Otra estrategia fue en un principio barajada: hacer que fueran iguales las relaciones entre las pérdidas y los beneficios derivados de las dotaciones que venían percibiendo los regantes, antes de tenerse que introducir la restricción de agua. Estas últimas no tienen por qué ser iguales a las dotaciones de referencia. Pero, haciendo esto, aquellos regantes que tuvieran unas dotaciones insuficientes se verían claramente perjudicados.

En el escenario base en el que hay varias funciones de beneficio y diferentes asignaciones iniciales, no puede generalizarse cuál de estas cuatro reglas es la más eficiente, porque ello dependerá de cuáles sean las funciones de beneficio. Sin embargo, cuando el consumo de agua es el mismo, la Regla 4 es siempre una opción mejor que las reglas 1 y 2, si bien será menos eficiente que la Regla 3. En el inusual escenario en el que haya una única función de beneficio, pero las aportaciones de agua sean diferentes, las menores pérdidas se conseguirán con la Regla 1. A estos resultados se ha llegado de manera empírica, mediante ejemplos numéricos y funciones de beneficio específicas.

Regla 5: Minimizar la pérdida agregada de beneficio

El reparto de agua más eficiente será aquel por el cual la pérdida total de beneficio, **L**, sea mínima; o también, el que consigue que el beneficio agregado para toda la comunidad sea máximo. La restricción a este problema de optimización es que la suma de las correspondientes asignaciones, q_i^* , no supere la cantidad total de recursos disponibles. Esta condición de óptimo no toma en cuenta criterio alguno de equidad, pudiendo dar lugar a que las pérdidas entre los regantes sean considerablemente desiguales.

Aunque en el capítulo 5.1 ya se ha planteado la formulación analítica de esta regla, se incluye a continuación un resumen de la misma, para mayor claridad. Para la solución óptima, el beneficio marginal es el mismo para todos aquellos que reciben agua. Así pues, siendo cuadráticas las funciones de beneficio, cada asignación podrá calcularse a partir de la expresión (30), contenida en el epígrafe 5.1.2.2:

$$BM_i = \frac{BR_{ri}}{q_{ri}} \cdot 2 \cdot (1 - q_i^*) = \mathbf{BM} \quad \rightarrow \quad q_i^* = 1 - \frac{\mathbf{BM}}{2} \cdot \frac{q_{ri}}{BR_{ri}} \quad (30)$$

Para el valor resultante de **BM**, dado que todas las asignaciones tienen que ser mayores o iguales a cero ($q_i \geq 0 \rightarrow q_i^* \geq 0$), aquellos cultivos para los que no se cumpla que $2 \cdot BR_{ri} / q_{ri} > \mathbf{BM}$ quedarán sin asignación. Cada valor de **BM** se corresponderá con una disponibilidad de agua, **Q**. Una vez estimado **BM**, la expresión (32) de 5.1.2.2 permite determinar **Q**:

$$\mathbf{Q} = \sum q_{ri} \cdot q_i^* = \sum q_{ri} \cdot \left(1 - \frac{\mathbf{BM}}{2} \cdot \frac{q_{ri}}{BR_{ri}} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot BR_{ri}}{q_{ri}} > \mathbf{BM} \right) \quad (32)$$

La estimación habrá de ser modificada hasta la convergencia: reduciendo **BM**, si **Q** es demasiado baja, o aumentándolo, en caso contrario. Con otro tipo de funciones, que se podrían incluir en el modelo, se procedería de manera similar.

Lo lógico será resolver el problema al revés, es decir, partiendo de **Q**, determinar **BM** de forma iterativa, a partir de (32). Una vez obtenido **BM**, las asignaciones específicas por cultivo, q_i^* , pueden ser calculadas mediante la expresión (30). La solución es independiente del reparto inicial, ya que, con la regla óptima, se alcanza la mínima pérdida agregada de beneficio, tanto si las asignaciones iniciales son las de referencia o de máximo beneficio, como si no lo son.

5.2.4. Estudio de caso

La eficiencia de todas estas reglas ha sido analizada en la comunidad de regantes V de los *Riegos de Bardenas*, localizada en las provincias de Zaragoza y Navarra. A causa de su extensión (15895 ha) y variedad de cultivos, con diferentes dotaciones de agua, constituye un buen ejemplo para nuestro análisis. Lo que es más, esta comunidad ofrece datos suficientes como para implementar los métodos analíticos aquí desarrollados. En sus informes anuales (CRVRB, 2011, 2012 y 2013) se publican las alternativas y superficies de cultivo, así como el consumo de agua de las últimas campañas. Así, se indica que la concesión media para el año 2011 estaba en $7036 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, y en $6523 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para 2012. Por tanto, de 2011 a 2012 se esperaba en esta comunidad una reducción del 7.29% de la dotación media. Sin embargo, la reducción registrada fue de tan sólo un 3.20%.

Se definió un escenario base con el patrón de cultivos del año 2011, junto con las asignaciones en condiciones de no escasez (tabla 3). Estas asignaciones de referencia se fijaron como las mayores de la serie 2006-2012. Con las mismas, se prevé alcanzar el máximo beneficio. Según esto, puede decirse que el consumo de agua en 2011 fue un 5.23% inferior al que hubiera resultado de haberse satisfecho todas las demandas. Para estimar los márgenes económicos de cada cultivo, se tomaron datos de las estadísticas oficiales (Gobierno de Aragón, 2012) y de algunos documentos técnicos.

Tabla 3. Escenario base en la comunidad V de Riegos de Bardenas

Patrón de cultivos en 2011			Asignación de referencia (q_r) $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$	Beneficio de referencia del riego (BR_r) $\text{€}_{2011} \text{ ha}^{-1}$	Beneficio de referencia del secano (B_s) $\text{€}_{2011} \text{ ha}^{-1}$
Usos / cultivos	Superficie (A) ha	%			
Alfalfa	2 991	18,82	12 271	823,94	83,35
Maíz	3 741	23,54	9 477	213,95	26,42
Cereales	4 905	30,86	3 884	112,55	68,80
Praderas	1 725	10,85	10 689	696,71	430,77
Arroz	689	4,33	9 312	776,09	-269,47
Hortícolas	487	3,06	10 620	2 222,38	-123,72
Girasol	221	1,39	6 552	34,16	2,35
Leguminosas	342	2,15	2 524	660,37	385,17
Arbolado	171	1,08	2 935	0,00	0,00
Viña	29	0,18	736	527,86	1 027,81
Abandono	594	3,74	0	0,00	0,00
Totales	15 895	100,00	$124,07 \cdot 10^6$	6 884 409	1 344 815

Con el método descrito en el punto 5.1.2.1, resumido en el 5.2.2, se determinaron las funciones de beneficio cuadráticas para estos cultivos. Con ellas, las cinco reglas definidas en las secciones teóricas fueron aplicadas al escenario base. Las superficies se mantuvieron, incluso la de la tierra retirada del cultivo (abandono). La reducción prevista del 7.29% de la dotación media del año 2011 fue asumida para todos los usos, excepto para los forestales. En términos de asignaciones de referencia, esto supuso una reducción del 12% ($Q^* = 88\%$). El arbolado se consideró como un uso social, y, por esta razón, no se modificó su asignación.

5.2.5. Resultados y análisis de sensibilidad

Los modelos analíticos que han sido planteados dieron los resultados que se muestran en la tabla 4. Las soluciones fueron obtenidas en una hoja de cálculo Excel, empleando la opción de cálculo iterativo y asumiendo valores iniciales que son automáticamente corregidos con procesos simples. Como alternativa, puede utilizarse un programa de optimización matemática, tal como el General Algebraic Modeling System (GAMS) o la herramienta Solver de Excel. Esta última sirvió para corroborar los resultados obtenidos.

Tabla 4. Reparto de agua y pérdidas de beneficio, aplicando las cinco reglas a la comunidad V de Riegos de Bardenas, para una reducción del 12% del agua disponible en 2011

Usos / cultivos	REGLA 1		REGLA 2		REGLA 3		REGLA 4		REGLA 5	
	Asignación	Pérdidas	Asignación	Pérdidas	Asignación	Pérdidas	Asignación	Pérdidas	Asignación	Pérdidas
	m ³ ha ⁻¹	€ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	€ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	€ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	€ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	€ ha ⁻¹
Alfalfa	9 047	56,87	10 778	12,19	11 329	4,86	10 854	10,99	11 473	3,49
Maíz	9 047	0,44	8 324	3 17	8 049	4,86	8 371	2,91	7 643	8,01
Cereales	3 884	0,00	3 412	1,67	3 077	4,86	3 341	2,20	3 298	2,56
Praderas	9 047	16,44	9 389	10,31	9 796	4,86	9 192	13,66	9 973	3,13
Arroz	9 047	0,63	8 179	11,48	8 575	4,86	8 484	6,14	8 824	2,13
Hortícolas	9 047	48,74	9 328	32,88	10 123	4,86	9 484	25,42	10 398	0,97
Girasol	6 552	0,00	5 755	0,51	4 081	4,86	5 806	0,44	1 061	23,99
Leguminosas	2 524	0,00	2 217	9,77	2 308	4,86	2 174	12,66	2 482	0,18
Arbolado	2 935	0,00	2 935	0,00	2 935	0,00	2 935	0,00	2 935	0,00
Viña	736	0,00	646	7,81	665	4,86	597	18,84	732	0,02
Abandono	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Totales (hm ³ ; 10 ³ €)	109,04	224,25	109,04	101,86	109,04	73,50	109,04	99,68	109,04	65,67

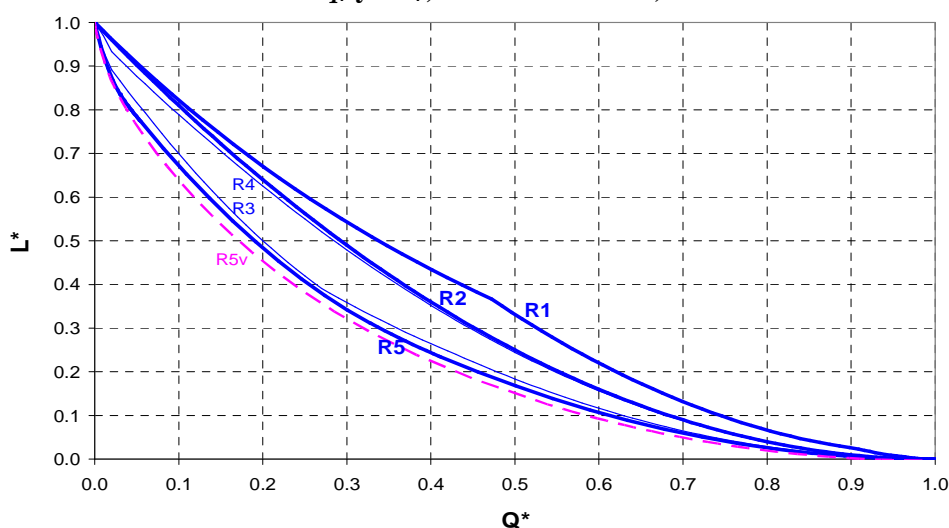
Mediante este estudio de caso, hemos visto que la reducción proporcional (Regla 2) es menos eficiente que la regla de igualar pérdidas absolutas (Regla 3) y que la de minimizar la pérdida agregada en la comunidad (Regla 5). De hecho, de acuerdo con los datos disponibles, con el reparto óptimo, la pretendida reducción de agua del 7.29% provocaría unas pérdidas de 4.13 €

ha^{-1} , en lugar de los 6.41 € ha^{-1} que supondría la Regla 2, ahorrándose 36189 € al conjunto de la comunidad. Con la Regla 3, las pérdidas serían de 4.62 € ha^{-1} , y se ahorrarían 28352 € con respecto a la Regla 2.

La eficiencia de la Regla 4 ha resultado ser ligeramente mejor que la de la Regla 2: 6.27 € ha^{-1} . Ahora bien, las estrategias de igualar pérdidas o lucros cesantes permitirían introducir un cierto criterio de equidad, sobre todo la Regla 4. Por su parte, la Regla 1 es claramente la menos eficiente, incluso por comparación con la regla proporcional. Hasta 10 ha^{-1} y 158581 € habrían sido ahorrados, de implementar la Regla 5 en vez de la Regla 1.

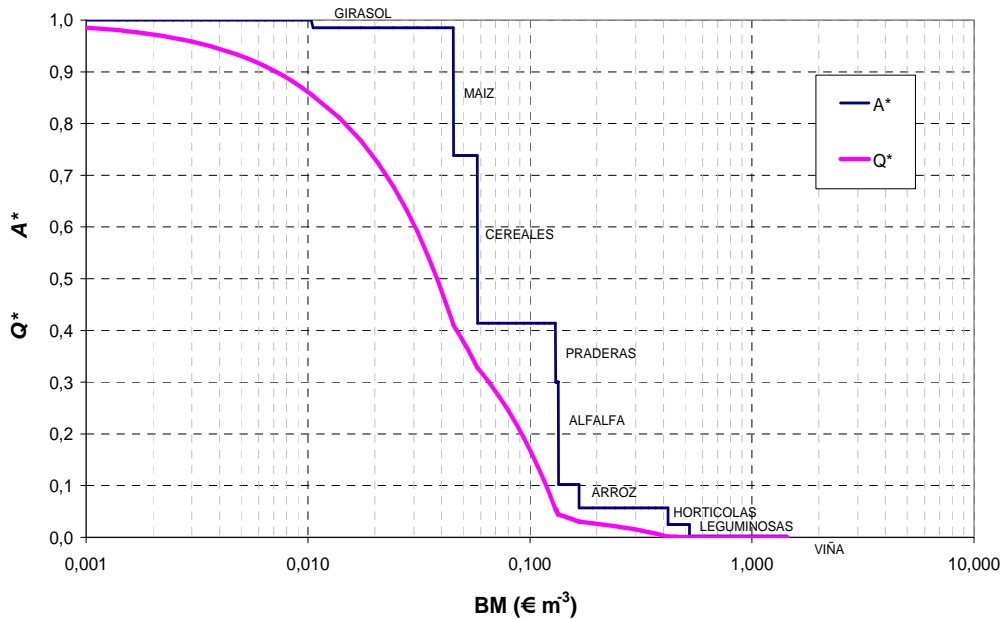
Estos cálculos se hicieron también para otros niveles de disponibilidad de agua, Q^* . La figura 19 muestra que, para valores menores de Q^* (mayores restricciones), la pérdida agregada de beneficio, L^* , aumentaría con las cinco reglas. Las mayores diferencias entre reglas tendrían lugar para una $Q^* \approx 30\%$. Bajo una escasez de estas proporciones, la aplicación de la Regla 5 en vez de la Regla 2 permitiría ahorrar unos 80 € ha^{-1} y hasta 1235000 € a toda la comunidad.

Figura 19. Pérdidas agregadas, L^* , en función de la disponibilidad de agua, Q^* , aplicando las cinco reglas a la comunidad V de Riegos de Bardenas ($R5v \equiv R5$ con variaciones en los valores de q_r y BR_r ; ver más adelante)



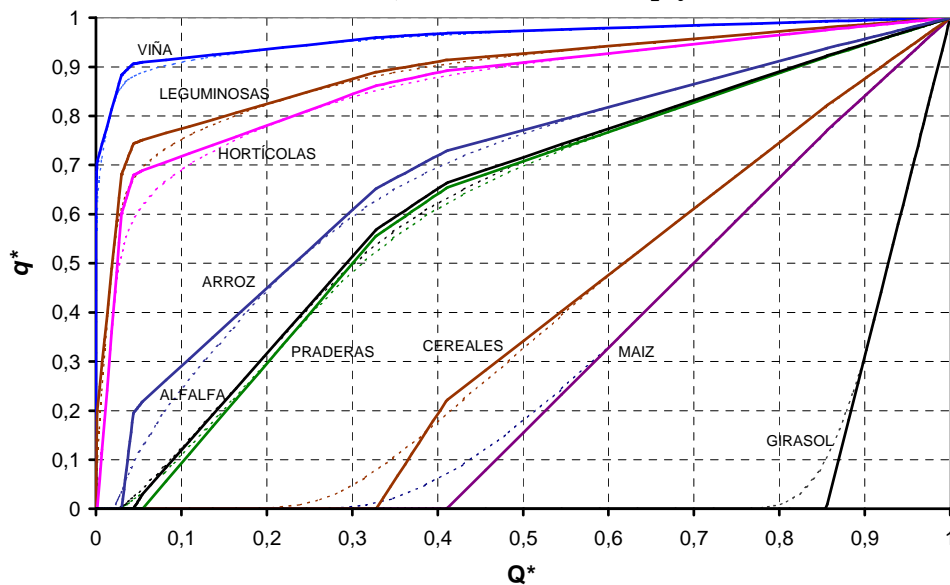
La figura 20 representa el beneficio marginal medio del agua de riego, **BM**, en función de la disponibilidad de agua, Q^* , el cual puede interpretarse como su productividad media. Para la reducción del 12% en el volumen de referencia ($Q^* = 88\%$), **BM** es 0.0085 € m^{-3} .

Figura 20. Beneficio marginal, BM, relativo al agua disponible, Q^* , y fracción de superficie cultivada, A^* , aplicando el reparto óptimo a la comunidad V de Riegos de Bardenas (las líneas de trazos representan la variante R5v, con variaciones en q_r y BR_r)



Por su parte, en la figura 21 se relacionan las fracciones de agua a disposición de la comunidad, Q^* , y a disposición de los cultivos, q^* , ambas con respecto a la situación de referencia, en la que no hay restricciones, y en aplicación del reparto óptimo (Regla 5). Ante reducciones crecientes de Q^* , la superficie cultivada se ve privada progresivamente del riego, empezando por el cultivo menos rentable (girasol) y acabando con el más rentable (viña).

Figura 21. Fracción de agua disponible para cada cultivo, q^* , en función de la total, Q^* , aplicando el reparto óptimo a la comunidad V de Riegos de Bardenas (las líneas de trazos representan la variante R5v, con variaciones en q_r y BR_r)



Los resultados y gráficos de este estudio han sido obtenidos considerando una única clase por cultivo (salvo los referentes a la regla 5v). No obstante, pueden distinguirse varias clases, considerando diferencias en los parámetros de referencia, debidas, por ejemplo, a los suelos, las pendientes, la radiación, la capacidad de los agricultores o cualquier otro factor relevante. De algún modo, esta más que probable heterogeneidad ha sido modelada con la Regla 5v, al considerar ciertas *variaciones* en las asignaciones de agua y en los beneficios del riego en la situación de referencia. En concreto, se estimaron nueve clases por cultivo. Para cada cultivo se consideró una distribución normal, que toma como media el par correspondiente de valores q_r y BR_r , y presenta una variación determinada por sendos coeficientes: $CV_{qr} = 0.15$ y $CV_{BRr} = 0.30$. Con ambos CV , se calcularon tres valores de q_r y otros tres de BR_r : [$q_r \cdot (1 - CV_{qr})$, q_r , $q_r \cdot (1 + CV_{qr})$] para q_r y [$BR_r \cdot (1 - CV_{BRr})$, BR_r , $BR_r \cdot (1 + CV_{BRr})$] para BR_r . Su combinación da lugar a nueve clases para cada uno de los nueve cultivos presentes en la comunidad estudiada. La superficie dedicada a cada clase fue asignada de acuerdo con las probabilidades de la correspondiente distribución binormal: 0.204 para (q_r, BR_r) , 0.075 para $(q_r \cdot (1 \pm CV_{qr}), BR_r \cdot (1 \pm CV_{BRr}))$, 0.124 para $(q_r \cdot (1 \pm CV_{qr}), BR_r)$ y $(q_r, BR_r \cdot (1 \pm CV_{BRr}))$. En las figuras 19, 20 y 21, las líneas de trazos representan esta diferenciación en 81 (9x9) clases de cultivo. Es de destacar que, cuanto mayores son CV_{qr} y CV_{BRr} , los resultados obtenidos son mejores, en tanto que las pérdidas agregadas de la comunidad son menores (ver líneas R5 y R5v de la Figura 19). Como consecuencia, es muy recomendable buscar unos datos precisos.

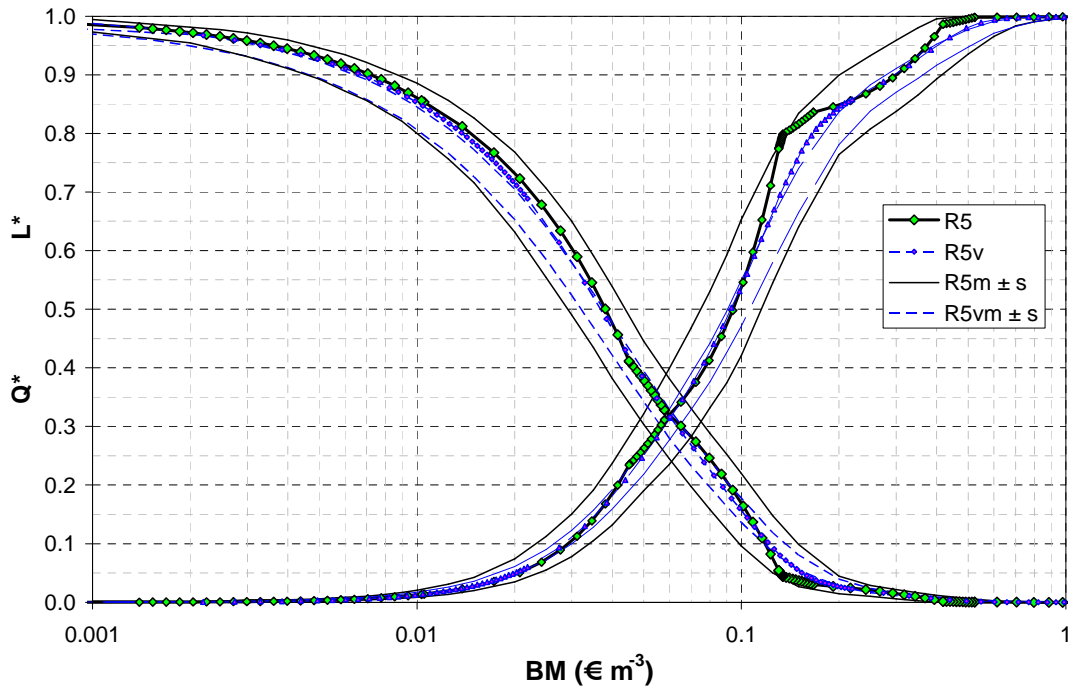
Una cuestión conceptualmente diferente es la de los errores que pueden cometerse en la determinación de los valores de referencia, q_r y BR_r , los cuales darían lugar a unas asignaciones inadecuadas. Estos errores pueden formularse matemáticamente. Para hacer esto, podemos asumir que los valores de referencia corresponden a los valores medios, $(\overline{q_r}, \overline{BR_r})$, de una serie de variables aleatorias que siguen una distribución normal de probabilidad, cuyos coeficientes de variación, (CV_{qr}, CV_{BRr}) , son conocidos e independientes.

Para obtener unos intervalos de confianza, específicos por cultivo, para cada q_r y BR_r , se determinaron sus medias y desviaciones mediante simulaciones de Monte-Carlo, como sigue: definimos dos valores aleatorios, F_i y F_j , entre 0 y 1, y hallamos luego los valores (u_i, u_j) que se corresponden con las distribuciones normales de probabilidad acumulada para F_i y F_j . Con ellos, obtenemos q_{ri} y BR_{rj} , de las siguientes expresiones:

$$q_{ri} = \overline{q_r} \cdot (1 + u_i \cdot CV_{qr}) \quad BR_{rj} = \overline{BR_r} \cdot (1 + u_j \cdot CV_{BRr}) \quad (47)$$

Tomando los mismos CV del caso anterior, se calcularon todos estos q_r y BR_r . Este proceso se repitió 1000 veces para cada valor de BM , en aplicación de la Regla 5. Con ello, se obtuvieron los intervalos de confianza (media \pm error estándar), tanto para R5 como para R5v. Estos intervalos se muestran en la figura 22, junto con la curva $Q^*(BM)$ de la figura 20, para R5, que ahora se representa con líneas y símbolos. Los intervalos de confianza para ésta (R5m \pm s) se representan con líneas continuas, mientras que los de R5v (R5vm \pm s) aparecen con líneas de trazos.

Figura 22. Intervalos de confianza para las pérdidas de beneficio, L^* , y el agua disponible, Q^* , según el valor marginal del agua, BM , aplicando el reparto óptimo (R5, R5v) a la comunidad V de Riegos de Bardenas



En la figura 22 se pone de relieve que los valores medios (comprendidos entre las líneas continuas) no coinciden con los valores medios previamente obtenidos para la Regla 5, sin considerar la incertidumbre. Así mismo, que con R5v, los intervalos de confianza son bastante más estrechos que con R5. Y es que, al haber subdividido en 9 unidades cada unidad productiva, la desviación estándar se ve disminuida en $\sqrt{9} = 3$ veces. La división en clases de cultivo (R5v) no sólo sirve por tanto para reducir las pérdidas totales de beneficio en condiciones de escasez de agua, sino que además reduce la sensibilidad a los errores que pueden producirse al estimarse los valores de referencia q_r y BR_r .

5.2.6. Conclusiones

En este trabajo se proponen y analizan cinco reglas para la reasignación del agua, con la finalidad de mejorar la gestión de su escasez en las comunidades de riego. Estas tienen sus ventajas prácticas, y algunas poseen propiedades importantes para la optimización del uso de este recurso, con las cuales evitar pérdidas económicas innecesarias. Aún así, pueden conducir a unas asignaciones poco equitativas. La regla óptima permite alcanzar una reducción específica de agua a un coste mínimo para el conjunto de los regantes. Sus niveles de eficiencia podrían ser tales, que no haya mecanismo alguno de mercado que los mejore. Se concluye que las pérdidas resultantes de la aplicación de una u otra regla pueden ser más o menos importantes, dependiendo de las características de la comunidad de regantes y de la gravedad de la escasez de agua.

Se ha puesto de manifiesto que la regla proporcional, aún siendo empleada frecuentemente por los colectivos de riego, no es muy eficiente, en comparación con las reglas que igualan lucros cesantes, y mucho menos eficiente que la regla que minimiza las pérdidas totales de beneficio. Las diferencias entre el reparto óptimo y las demás reglas son mayores cuando se toman en consideración los diferentes factores técnicos, económicos y ambientales que intervienen en la producción. Únicamente en situaciones en las que todos los regantes fuesen idénticos y el suministro de agua fuera abundante y a un precio reducido, la regla proporcional podría considerarse suficientemente eficiente, desde un punto de vista económico. Sin embargo, bajo restricciones moderadas o severas y/o tarifas elevadas del agua, deberían promoverse otros instrumentos de asignación, con vistas a intentar satisfacer los diferentes intereses de los agricultores. En situaciones de escasez moderada o grave, la aplicación del reparto óptimo supondría retirar del riego a los cultivos menos rentables. En función de las previsiones de agua, se debería trasladar esta información a los regantes, sobre todo en las cuencas con escasez hídrica, para que estuviesen mejor preparados ante un suministro deficitario.

Las reglas de asignación analizadas no requieren necesariamente transformar la estructura organizativa ni el funcionamiento general de las comunidades de regantes. Por otra parte, los procedimientos matemáticos para llevarlas a cabo carecen de complejidad técnica o administrativa. Por contra, estas reglas exigen una redefinición de los derechos del agua o un acuerdo interno entre los propietarios, lo cual, en ciertas circunstancias puede llegar a ser el principal obstáculo para su implementación. Así mismo, se precisan conocer las funciones de

beneficio específicas para las distintas clases de cultivo, y también medir el agua que es realmente aplicada, por lo que serían muy oportunos los estudios en este sentido. Las dificultades inherentes a la estimación de estas funciones y los parámetros necesarios invitan a buscar la manera de lidiar con la incertidumbre, lo cual seguramente sería más fructífero.

Así mismo, habrían de estudiarse las reservas hídricas en cada momento, de forma tal que la asignación de dotaciones pudiera ser constantemente actualizada, en función de la disponibilidad de agua. Del mismo modo, sería aconsejable estudiar los costes sociales, incluyendo los del largo plazo, así como los costes de implantar y aplicar estas estrategias. Otros aspectos no abordados en este trabajo, tales como la capacidad de las instituciones para lograr un buen funcionamiento de aquéllas o el grado de aceptación social, deberían ser igualmente tenidos en cuenta. A este respecto, sería oportuno incrementar la participación directa de los agentes implicados en las decisiones de gestión del agua.

5.3. LA REGLA DEL REPARTO ÓPTIMO Y LOS MERCADOS DE AGUA

Artículo “The optimal allocation rule and the water market as the most effective tools of managing water shortage in an irrigation district”. Aceptado para presentación en el *VI Congreso de la Asociación Hispano-Portuguesa de Economía de los Recursos y el Medio Ambiente (AERNA)*. Girona, 4-6 Septiembre 2014.

Autores: Javier Alarcón, Alberto Garrido y Luis Juana.

5.3.1. Introducción

La gestión económica del agua puede hacerse mediante sistemas de precios, la asignación de derechos o una combinación de ambos; y también, de manera indirecta, mediante un mercado. Las posibilidades y ventajas de estos instrumentos dependen de las características físicas, económicas, culturales, políticas, legales e institucionales de cada caso en particular (Tsur, 2009). Son muchos los expertos y las organizaciones que apoyan los mecanismos de mercado, en la gestión de los recursos hídricos. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático estima que los mercados de agua pueden ayudar de manera importante a reducir la vulnerabilidad del suministro de agua (IPCC, 2007). La Agencia Europea de Medio Ambiente considera que los instrumentos de mercado son esenciales para la gestión sostenible y la asignación eficiente del agua (EEA, 2012). Según Adler (2009), los mecanismos de mercado ofrecen la mejor oportunidad para adaptarse al cambio climático y a sus impactos sobre los recursos hídricos. En la actualidad, la actividad de estos mercados está ayudando a paliar los problemas de escasez de agua en muchas regiones del mundo (Griffin *et al*, 2013).

Los mercados de agua se han desarrollado sobre todo en zonas con problemas de escasez de recursos hídricos. En la mayoría de los casos, han dado lugar a la conservación de los recursos, a una mayor concienciación sobre su valor real y a la inversión en tecnologías de ahorro y reutilización (Rico y Gómez-Limón, 2005). Las ventajas de los mercados de agua se han puesto de manifiesto en ciertos estudios llevados a cabo en diversos lugares, por ejemplo, de Estados Unidos, España o Chile. Un análisis comparativo en los estados de Arizona, California, Colorado, Nevada, Nuevo México y Utah demostró que: *i*) estos mercados parecen ser relativamente eficientes para transferir el agua a los usos considerados como más rentables; *ii*) las externalidades que se ocasionan por el uso consuntivo de los recursos (por ejemplo, una menor disponibilidad aguas abajo), se ven reflejadas por lo general en las decisiones y en los

precios del mercado; no así las relacionadas con la calidad del agua o la aportación de caudales, que no quedan debidamente representados; y *iii*) los mercados de agua a menudo se alejan bastante del modelo competitivo, siendo el precio de mercado tan sólo una vaga aproximación al valor que los participantes otorgarían a la aportación de recursos adicionales (Saliba y Bush, 1987; Saliba, 1987; Saliba *et al*, 1987). Mercados hipotéticos de agua se han simulado en algunas comunidades de regantes del sur de España (ver p.e. Arriaza *et al*, 2002; Calatrava y Garrido, 2005; o Albiac *et al*, 2006). De la comparación de un mercado simulado en Alicante con otros instrumentos de gestión empleados en otras zonas regables de España, se ha deducido que es con el primero con el que más beneficios consiguen los regantes. Las diferencias pueden no ser grandes cuando la escasez de agua es moderada, pero son importantes cuando la escasez es severa (Lee y Jouravlev, 1998).

No obstante, los mercados de agua demandan una cierta aptitud por parte de las administraciones, los órganos jurisdiccionales y los propios usuarios, así como una cierta inversión en el registro de los derechos, en la medición y el control de los consumos y, en algunos casos, en adecuar las redes de transporte de agua. Cualquier mercado requiere, para ser eficiente, que se cumplan unos ciertos requisitos: *i*) que los derechos al uso del agua estén bien definidos; *ii*) que exista una información pública suficiente de la oferta y la demanda de esos derechos; y *iii*) que haya un marco físico, legal e institucional que permita su cesión (Curie, 1985). La asignación de unos derechos bien definidos es una cuestión básica, no sólo para asegurar que los mercados operen adecuadamente, sino también para poder gestionar de forma eficiente los cada vez más frecuentes periodos de sequía (Lorenzo-Lacruz *et al*, 2013). Ante cualquier reparto inicial de agua que no sea el óptimo, un mercado podría dar lugar a otro reparto más beneficioso económicamente para el colectivo que opera en ese mercado; pero, si los derechos de partida están mal definidos, el mercado no podrá garantizar que los recursos sean reasignados de un modo óptimo. Las instituciones juegan por tanto un papel crucial en el correcto funcionamiento de los mercados, desde el momento en que, mediante la asignación de esos derechos, proporcionan la base para su actividad (Lee y Jouravlev, 1998).

Un comercio continuo de derechos al uso del agua da lugar a unos precios que revelan las preferencias de los usuarios y que reflejan el coste del recurso o el coste de su escasez relativa. El precio es un dato valioso, que resume toda la información de que disponen los agentes que participan en el mercado, y que condiciona sus actuaciones y el reparto de los recursos entre ellos, en respuesta a las cambiantes condiciones de oferta y demanda. Por lo tanto, los derechos

transferibles al uso del agua crean un sistema de incentivos económicos, en el cual aquéllos que mejor conocen los beneficios que reporta este recurso pueden aplicar ese conocimiento para destinarlo a los usos de mayor valor, maximizando con ello su valor económico (Molle & Berkoff, 2006; Adler, 2009). La medida en que los precios de mercado observados sirvan para estimar el valor de la escasez del agua y para procurar su asignación eficiente, dependerá del grado en que ese mercado se aproxime al paradigma competitivo (Cummings y Nercissiantz, 1992). Los costes relativos a la transferencia de la propiedad, o costes de transacción, así como los costes de transporte del agua, pueden afectar significativamente a la capacidad de cualquier mercado para operar eficientemente. Los costes de transacción dificultan que los valores marginales del agua se igualen entre los distintos usos, usuarios y lugares, representando ganancias insatisfechas en el mercado y, en consecuencia, asignaciones ineficientes. Si los costes de transacción fuesen mayores que las ganancias, las transacciones no serían rentables y no se llevarían a cabo (Beare *et al*, 2003; Martin *et al*, 2008; Lefebvre, 2011). Por el contrario, si fueran nulos, la distribución inicial de derechos entre las partes no influiría en la eficiencia del mercado (Coase, 1960). Por lo tanto, los costes de transacción deberían ser incluidos en los análisis económicos de los mercados (McCann & Easter, 2004; Freebairn & Quiggin, 2006).

En principio, cualquier reparto de agua podría lograrse con la correspondiente asignación de dotaciones o mediante una combinación adecuada de asignaciones y tarifas. En el capítulo anterior se han visto varias formas de reasignar el agua de riego ante situaciones de escasez, teniendo en cuenta el diferente valor productivo que puede tener este recurso en la agricultura. Y se ha formulado la regla más eficiente, desde un punto de vista económico, que es aquella que permite maximizar el beneficio económico agregado en una comunidad. Este mismo objetivo se ha incluido en varios modelos de asignación del agua de riego (Reca *et al*, 2001; Shangguan *et al*, 2002; Benli y Kodali, 2003; Letcher *et al*, 2004; Ortega *et al*, 2004; Babel *et al*, 2005; o Jin *et al*, 2012). Por su parte, existen también abundantes trabajos en los que se busca maximizar el beneficio conjunto mediante la simulación de mercados de agua. En muchos de éstos se apunta a que las opciones de mercado son más eficientes desde un punto de vista económico que las de no mercado, especialmente en situaciones de escasez, aunque las ganancias que los regantes obtengan puedan ser muy distintas entre sí (Arriaza *et al*, 2002; Martínez y Gómez-Limón, 2004; Calatrava y Garrido, 2006; Pujol *et al*, 2006; Blanco-Gutiérrez *et al*, 2011). Goetz *et al* (2005) concluyen que, desde el punto de vista de la eficiencia económica, un mercado conduce en general a unos mejores resultados que la regla proporcional, particularmente en condiciones de escasez grave de agua.

Poddar *et al* (2014) argumentan que la introducción de los mercados de agua se ve a menudo obstaculizada por el conflicto entre los objetivos de eficiencia, equidad y sostenibilidad. Teóricamente, aspectos como la cuantificación de los recursos utilizados, la equidad en el reparto o la consideración de las preferencias sociales, podrían ser mejor integrados empleando instrumentos de no mercado. Pero esta circunstancia no avoca necesariamente a este tipo de alternativas (Anderson, 1982). Es más, en condiciones de restricción de agua, el objetivo único de maximizar la producción agregada en una zona de riego puede provocar pérdidas económicas muy dispares entre los agricultores (ver p.e. Smout y Gorantiwar, 2006; Gorantiwar y Smout, 2007; o, mismamente, los estudios de caso en 5.1 y 5.2). Por el contrario, el mercado puede resultar equitativo, en el sentido de que la reasignación de agua tiene lugar a través de unos intercambios voluntarios que son beneficiosos para las dos partes interesadas. De otro modo, no tendrían lugar. No obstante, los mercados sólo pueden garantizar ese mutualismo entre las partes, si ninguna de ellas puede influir en el precio final. Además, a no ser que sean controlados institucionalmente, los mercados, por lo general, no podrán garantizar que haya terceras partes que puedan verse afectadas negativamente (Lee y Jouravlev, 1998).

En este trabajo se muestra que los mercados de agua intra-sectoriales pueden llegar a mejorar sustancialmente la eficiencia económica de otros instrumentos, y aproximarse al reparto más rentable para el conjunto de los regantes de una comunidad. Esta aproximación será tanto mayor cuanto menores sean los costes de transacción, aspecto éste que también se analiza. El marco de estudio es una misma comunidad de riego, al asumir que el éxito de los mercados de agua dependerá de su adaptación a cada colectivo específico (Takahashia *et al*, 2013). El reparto óptimo del agua puede lograrse así mismo, como se ha dicho, mediante la correcta distribución de derechos de uso entre los miembros de la comunidad o colectivo de riego. El método analítico que permite calcular ese reparto óptimo, aplicable en situaciones de escasez de agua, consiste básicamente en igualar el beneficio marginal que los regantes obtienen de cada unidad regada, tal y como se ha formulado en los epígrafes precedentes. Esto último se ve supeditado a disponer de una información necesaria y suficiente, como también se ha visto.

5.3.2. Métodos

La formulación analítica que permite optimizar la asignación o el reparto del agua en una comunidad de riego ha sido ya expuesta en el punto 5.1.2.2. En esta sección nos centraremos

únicamente en la formulación de un mercado de agua, así como en las condiciones que deben darse para que éste pueda funcionar adecuadamente.

5.3.2.1. Planteamiento de un mercado de agua de riego

Tratándose de mercados de agua *intra-sectoriales*, como son los del agua de riego, la función objetivo a maximizar es la del beneficio agregado de la comunidad de riego, BR_m . La misma será la suma de los beneficios, BR_i , que, para las respectivas asignaciones, puede obtenerse de los cultivos i . Para los agricultores que ceden o venden agua, a ese beneficio hay que sumar el de la venta de los correspondientes derechos en el mercado, a un precio, P_m . Por el contrario, los compradores tendrán que pagar por los derechos que adquieren, a ese mismo precio:

$$BR_m = \sum_{i=1}^n BR(q_{mi}) + P_m \cdot (q_{pi} - q_{mi}) \quad (48)$$

en donde q_{pi} es la dotación inicial de agua, antes de operar en el mercado, que está asignada a cada uso o cultivo i , y q_{mi} es cada una de las asignaciones finales que resultan, una vez transferidos los correspondientes derechos. Lógicamente, cuando $q_{pi} > q_{mi}$, el agricultor que riega el cultivo i venderá derechos de agua; en caso contrario, los comprará, salvo que no haga ni una cosa ni la otra ($q_{pi} = q_{mi}$). Refiriéndonos a situaciones de escasez o restricción de agua, q_{pi} serán las asignaciones a las que se llega aplicando una cierta regla de reasignación: $q_{pi} = q_i^* \cdot q_{ri}$, en donde q_i^* es la fracción en tanto por uno que queda a disposición de cada cultivo i , con respecto a la dotación de referencia q_{ri} , con la cual dicho cultivo vería satisfechas todas sus necesidades hídricas.

Análogamente, para toda una comunidad de riego, la disponibilidad final de agua, después de aplicar una cierta reducción, será $Q^* \cdot Q_r$. Dicha cantidad no deberá superar la asignación de referencia de la propia comunidad, Q_r , y, a su vez, no debería ser superada cuando el mercado funcione. Si suponemos que la reducción es proporcional, $q_i^* = Q^*$. De este modo, tenemos una primera restricción: $\sum_{i=1}^n q_{mi} = \sum_{i=1}^n q_{pi} = Q^* \cdot Q_r$. Igualmente, ninguna asignación individual debe ser mayor que la correspondiente de referencia: $q_{mi} \leq q_{ri}$. Una tercera restricción es que ninguna asignación sea negativa: $q_{mi} \geq 0$.

Además de lo anterior, los volúmenes totales de agua que son comprados y vendidos deben coincidir y ser iguales a la cantidad total de agua transferida en el mercado. Habiendo k

compradores (superíndice c) y $n-k$ vendedores (superíndice v):

$$\sum_{i=1}^k (q_{mi}^c - q_{pi}^c) \cdot A_i = \sum_{i=k+1}^n (q_{pi}^v - q_{mi}^v) \cdot A_i, \text{ en donde } A_i \text{ es la superficie dedicada a cada cultivo.}$$

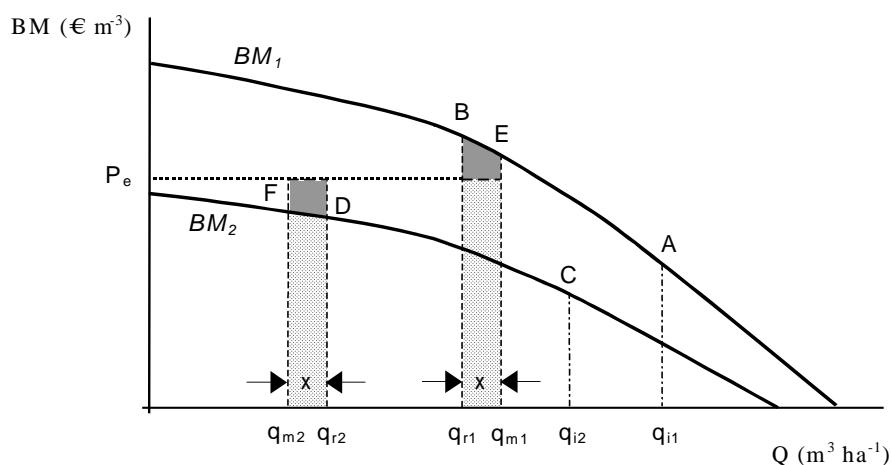
Se ha tenido en cuenta una última restricción, por la cual el beneficio que alcanzaría cada uno de los regantes a través del mercado no ha de ser inferior al que obtendría mediante la aplicación de la regla proporcional: $BR_{mi} \geq BR_{pi}$. Al hacer esto, el problema de optimización conduce a una solución para la que se satisface una condición implícita, tanto para compradores como para vendedores: $BM_i = cte$. En consecuencia, a través del mercado se llegaría a la misma solución que a través de la regla del reparto óptimo.

5.3.2.2. Condiciones de los mercados de agua

Para que un mercado tenga capacidad o flexibilidad para reasignar un recurso, es necesario que exista un cierto margen de negociación que permita su reasignación a un coste menor (Howe *et al*, 1986). Esta condición necesaria se ilustra en la siguiente figura 23. En ella se representa las funciones de beneficio marginal, BM , de dos cultivos, dos unidades de terreno, dos explotaciones o dos regantes. Una vez repartida el agua entre ambos, el cultivo 1 recibe una asignación q_{r1} , y el cultivo 2 otra inferior, q_{r2} . Así pues, siendo el primero más productivo que el segundo, al regante 1 le puede interesar adquirir derechos de agua del regante 2; y a éste último, cederlos al primero.

En la figura 23 vemos que, para un cierto volumen de agua intercambiable, x , el regante 1 tiene más que ganar que el regante 2 perder, porque, comparando las áreas punteadas en esta figura, $q_{r1}BEq_{m1} > q_{r2}DFq_{m2}$. Por lo tanto, existe margen de negociación. El regante 2 venderá parte de su dotación, $x = q_{r2} - q_{m2}$, por una cantidad de dinero que le permita mejorar la situación de no vender; es decir, la venderá a un precio suficientemente alto como para contrarrestar la pérdida de beneficio que le supone regar con menos agua, y, además, obtener un cierto beneficio extra. De forma similar, el regante 1 comprará derechos, $x = q_{m1} - q_{r1}$, a un precio lo suficientemente barato, como para obtener un cierto beneficio adicional. El punto de equilibrio de la negociación o de “isobeneficio” estará en el precio, P_e , para el cual ambos regantes ganan con la transacción exactamente lo mismo. Estas ganancias o beneficios adicionales del mercado se representan en la figura 23 mediante las dos áreas más oscuras. Al precio P_e le llamaremos, para mayor simplicidad, “precio de equilibrio”.

Figura 23. Condiciones teóricas para la transferencia de derechos al uso del agua (x) entre un comprador (1) y un vendedor (2), una vez se ha introducido una cierta restricción de agua $i \rightarrow r$



5.3.2.3. Costes de transacción

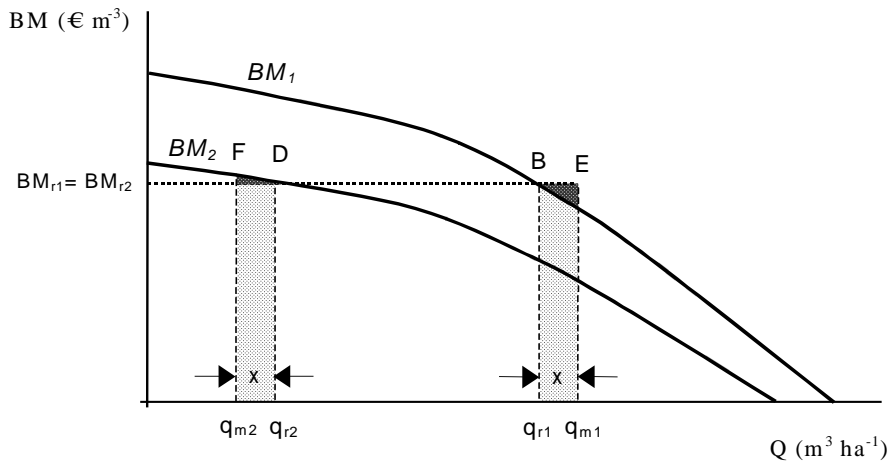
A no ser que las transacciones fueran hechas directamente entre los regantes, haría falta una organización que les permitiera ponerse en contacto y operar, un *mercado* en definitiva. Para que este mercado funcione, se requieren unos ciertos medios o recursos. Si el coste de los mismos se repercute, en todo o en parte, entre los participantes en el mismo, éstos tendrán que pagar una cierta cuota en las transacciones que se llevan a cabo. Son los llamados *costes de transacción*, C_t . Para simplificar, podemos incluir en ellos a los costes de transporte del agua y de las infraestructuras necesarias. De este modo, el precio de venta o precio final de mercado no sería P_e . Más bien, habría un precio percibido por el vendedor, de alrededor de $P_{mv} = P_e - C_t/2$, y otro mayor, pagado por el comprador, de alrededor de $P_{mc} = P_e + C_t/2$. Algunos componentes de C_t pueden ser independientes del volumen transferido, como, por ejemplo, el registro de los derechos y otros trámites. Los costes de transacción deberían ser compartidos entre compradores y vendedores, de un modo tal que cada uno pagara una cantidad $C_t/2$.

Dependiendo de los márgenes de negociación y de los costes de transacción, el mercado resultará o no atractivo a los regantes. Las transacciones tendrán lugar hasta que los valores marginales del agua, descontados los costes de transacción, se igualen entre usuarios, usos y lugares. Esta equiparación ocurre porque el mercado proporciona un incentivo y un medio para que los derechos de agua se destinen a unos usos de mayor valor. Así, si partimos de un reparto subóptimo, la introducción de un mercado permitiría alcanzar una eficiencia económica cercana a la óptima. Pero si, por el contrario, el punto de partida es el reparto óptimo, para el

cual el beneficio marginal de los regantes es el mismo, no habrá lugar a negociación alguna, y ningún mercado, independientemente de los costes de transacción, será capaz de mejorar la eficiencia de ese reparto.

Esto último puede observarse en la siguiente figura 24. Tomando como reparto inicial uno para el cual $BM_{r1} = BM_{r2}$, ni al regante 1 ni al regante 2 les interesaría adquirir o ceder agua, porque, de hacerlo, incurrirían en pérdidas. En efecto, si el regante 1 decide comprar derechos, debería hacerlo a un precio inferior a BM_{r1} ; pero, a ese precio, el regante 2 no estaría interesado en vender. Análogamente, si el regante 2 vende a un precio superior a BM_{r2} , el regante 1 no compraría, porque pagaría más que lo que obtiene a cambio, por disponer de más agua. En el caso extremo en que el precio de mercado iguala al beneficio marginal, por cada volumen intercambiado, x , los dos regantes afrontarían unas pérdidas, que en la figura 24 se representan mediante las dos áreas más sombreadas.

Figura 24. Condiciones teóricas de saturación del mercado, para las cuales la transferencia de derechos al uso del agua (x) no beneficia ni al comprador (1) ni al vendedor (2)



5.3.2.4. Formulación de un mercado de agua de riego, con variables adimensionales y parámetros de referencia

Buscando una mayor simplicidad en el resultado analítico, haremos uso de las variables adimensionales empleadas en los capítulos precedentes. Así, q_p^* representa la asignación relativa, con respecto a la de referencia (q_r), que corresponde al criterio de reparto que sea establecido; y q_m^* , la resultante de la introducción de un mercado. Además, en el precio que se pague finalmente por el agua, P_m , consideraremos los costes de transacción, C_t , como un porcentaje añadido del llamado “precio de equilibrio”, P_e , que reste beneficios: $P_m = P_e \pm C_t =$

$P_e \cdot (1 \pm C_t / P_e)$. De esta manera, a los compradores ($q_m > q_p$) les corresponde un C_t con signo positivo y a los vendedores un C_t con signo negativo. Así pues, recuperando la expresión (20) y siendo BR_r el beneficio máximo o de referencia para un cierto cultivo, el beneficio que se obtenga del mismo una vez aplicada una cierta restricción de agua ($Q^* = Q/Q_r$) se puede escribir como

$$BR = BR_r \cdot (2q_m^* - q_m^{*2}) + (P_e \pm C_t) \cdot q_r \cdot (q_p^* - q_m^*) \quad (49)$$

La dotación, q_m , que maximiza el beneficio de un regante, será:

$$\frac{dBR}{dq_m} = \frac{BR_r}{q_r} \cdot 2 \cdot (1 - q_m^*) - (P_e \pm C_t) = 0 \rightarrow q_m^* = 1 - \frac{P_e \pm C_t}{2} \cdot \frac{q_r}{BR_r} \quad (50)$$

Para todo un colectivo de riego, la función beneficio es:

$$BR = \sum BR_{mi} = \sum BR_{ri} \cdot (2q_{mi}^* - q_{mi}^{*2}) + (P_e \pm C_t) \cdot q_{ri} \cdot (q_{pi}^* - q_{mi}^*) \quad (51)$$

Y la de pérdidas:

$$L = \sum L_i = \sum BR_{ri} \cdot (1 - q_{mi}^*)^2 - (P_e \pm C_t) \cdot q_{ri} \cdot (q_{pi}^* - q_{mi}^*) \quad (52)$$

Con la restricción de la disponibilidad de agua, $\sum_{i=1}^n q_{mi} = \sum q_{ri} \cdot q_{mi}^* = Q$, para la determinación del óptimo, la función lagrangiana será:

$$\zeta_m = \sum_{i=1}^n (BR_{ri} (1 - q_{mi}^*)^2 - (P_e \pm C_t) \cdot q_{ri} \cdot (q_{pi}^* - q_{mi}^*)) + \lambda \cdot (\sum q_{ri} \cdot q_{mi}^* - Q) \quad (53)$$

Y la solución deberá cumplir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta_m}{\partial q_{mi}^*} &= -2BR_{ri} \cdot (1 - q_{mi}^*) + (P_e \pm C_t) \cdot q_{ri} + \lambda \cdot q_{ri} = 0 \rightarrow q_{mi}^* = 1 - \frac{(\lambda + P_e \pm C_t) \cdot q_{ri}}{2BR_{ri}} \\ \frac{\partial \zeta_m}{\partial (P_e \pm C_t)} &= \sum_{i=1}^n q_{ri} \cdot (q_{pi}^* - q_{mi}^*) = 0 \quad \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} = Q - \sum q_{ri} \cdot q_{mi}^* = 0 \end{aligned} \quad (54)$$

Sustituyendo la primera de las ecuaciones en la tercera:

$$Q - \sum q_{ri} + \frac{\lambda + P_e \pm C_t}{2} \cdot \sum \frac{q_{ri}^2}{BR_{ri}} = 0 \rightarrow \lambda + P_e \pm C_t = \frac{2(1 - Q^*) \cdot Q_r}{\sum \frac{q_{ri}^2}{BR_{ri}}} \quad (55)$$

E, introduciendo este valor en la expresión de q_{mi}^* en (54), la solución es:

$$q_{mi}^* = 1 - \frac{(\lambda + P_e \pm C_t) \cdot q_{ri}}{2BR_{ri}} = 1 - (1 - Q^*) \cdot \frac{q_{ri}}{BR_{ri}} \cdot \frac{Q_R}{\sum \frac{q_{ri}^2}{BR_{ri}}} \quad (56)$$

El valor que resulte de esta expresión habrá de ser positivo y menor que 1, ya que $0 \leq q_{mi}^* \leq 1$. Si el dato fuese Q^* y se emplearan funciones BR cuadráticas, habría que resolver mediante iteraciones, dado que $\sum \frac{q_{ri}^2}{BR_{ri}}$ no sería un valor constante, pues únicamente hay que computar los cultivos que intervienen en el reparto y quitar aquellos para los que $q = 0$. Tratándose de funciones BR potenciales, al no quedarse ningún cultivo sin agua, podrían obtenerse los q_{mi} directamente.

5.3.3. Estudio de caso

Al igual que el anterior epígrafe (5.2), este análisis ha sido aplicado a la comunidad de regantes V de *Riegos de Bardenas*, localizada en las provincias de Zaragoza y Navarra. Debido a su extensión (15.895 ha) y a su variedad de cultivos, con diferentes dotaciones, es un buen ejemplo para estudiar los efectos de un mercado de agua, habiendo datos suficientes como para ello. En sus informes anuales (CRVRB, 2011, 2012 y 2013) se publican las superficies de cultivo, así como el consumo de agua en las últimas campañas, indicando que, en respuesta a una menor disponibilidad, de 2011 a 2012 se esperaba una reducción del 7.29% de la dotación media.

Precisamente con el patrón de cultivos del año 2011, así como con las asignaciones de referencia en condiciones de no escasez, se definió un escenario base. El mismo se recoge en la tabla 3 del punto 5.2.4. Tal y como allí se dice, esas asignaciones de referencia se fijaron como las mayores de la serie 2006-2012. Considerando que con las mismas se prevé alcanzar el máximo beneficio, se ha estimado que el consumo de agua en 2011 fue un 5.23% inferior al necesario para haber satisfecho todas las demandas. Para estimar los márgenes económicos de cada cultivo, se tomaron datos de las estadísticas oficiales (Gobierno de Aragón, 2012) y de algunos documentos técnicos.

Con el método descrito en el punto 5.1.2.2, se determinaron las funciones de beneficio cuadráticas para los cultivos presentes en la comunidad V de *Riegos de Bardenas* durante el año 2011. Con ellas, la regla proporcional y el reparto óptimo fueron aplicados al escenario

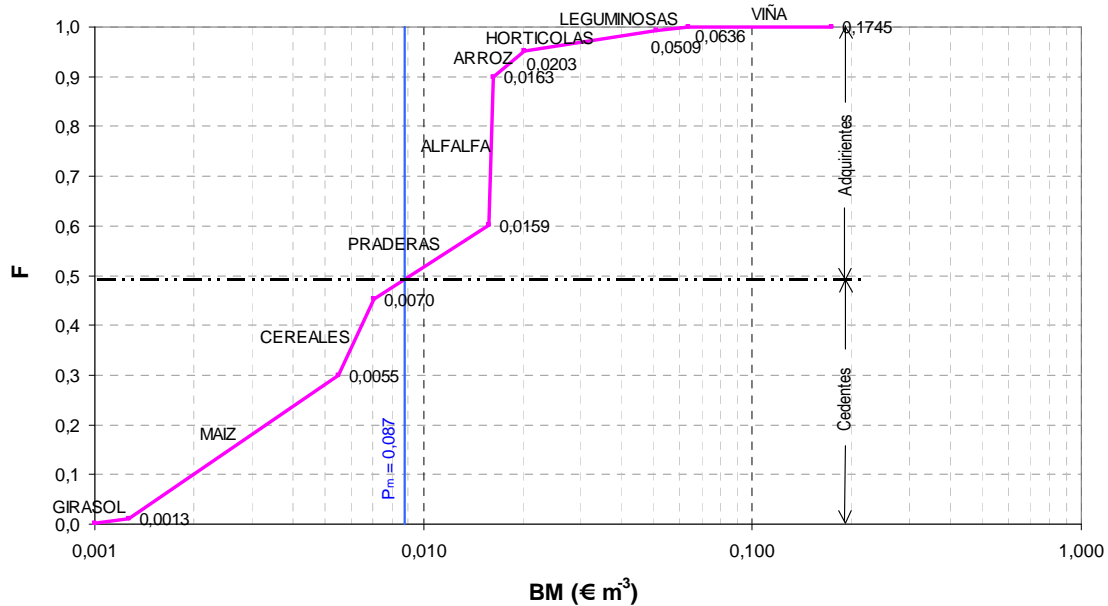
base, con el objetivo de conseguir la reducción del 7.29% de la dotación media de 2011. Después, tomando como punto de partida el reparto al que se llegaría por aplicación de la primera, se simuló un mercado interno de agua, en el cual no se superase esa nueva disponibilidad de agua. Al hacer esto, las superficies de los cultivos se mantuvieron sin cambios, y también la de abandono. Los usos forestales se consideraron de interés social, y, por esta razón, no se redujo su dotación. En términos de asignaciones de referencia, esto supuso una reducción del 12% ($Q^* = 88\%$). A su vez, con el fin de analizar los efectos de la gravedad de la escasez de agua, se ha manejado una restricción mucho más severa: un 25% de la disponibilidad de 2011 ($Q^* = 0.71$).

5.3.4. Resultados

Se ha calculado el reparto de agua que, en esta comunidad de riego, soluciona el problema de optimización, para una restricción de agua del 7.29% ($Q^* = 0.88$), referida al volumen disponible en 2011. Este reparto óptimo puede verse en la anterior tabla 4 del punto 5.2.5. El problema se ha resuelto igualmente para la reducción del 25% ($Q^* = 0.71$). Para ello, se aplicó el modelo analítico expuesto en 5.1.2.1, mediante una hoja de cálculo Excel, empleando la opción de cálculo iterativo y asumiendo unos valores iniciales que son corregidos automáticamente con procesos simples. A los mismos resultados se llega empleando la herramienta Solver del programa MsExcel.

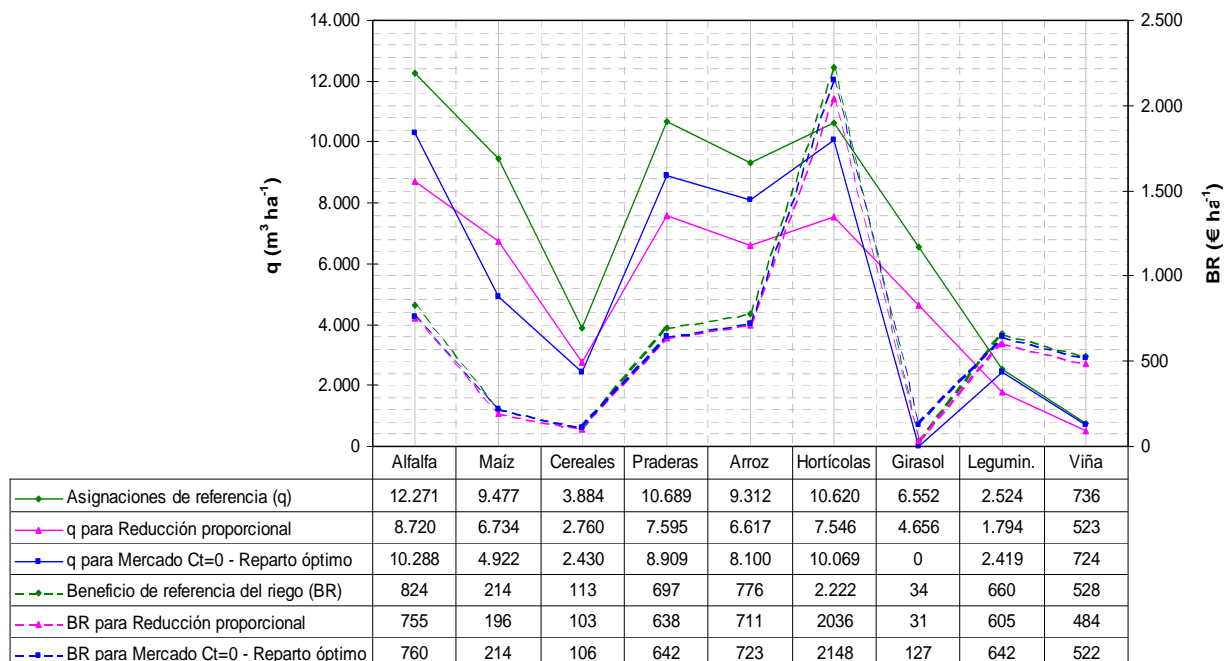
Para el mercado, el problema de maximización de beneficios se ha resuelto con la herramienta Solver de MsExcel, probando con varios precios para la unidad de agua intercambiada. Según lo dicho en la exposición teórica, después de aplicar la reducción proporcional, un mercado permite alcanzar los mayores beneficios del agua con un precio que equivale al beneficio marginal de toda la comunidad y a los beneficios marginales individuales de cada una de las parcelas o cultivos: $P_m = 0.0087 \text{ € m}^{-3}$ para $Q^* = 0.88$ y 0.0217 € m^{-3} para $Q^* = 71$. En la siguiente figura 25 se diferencian los cultivos de la comunidad V de *Riegos de Bardenas* en dos grupos, según que para ellos se adquieran o se transfieran derechos de agua, considerando la reducción del 7.29% ($Q^* = 0.88$).

Figura 25. Diferenciación, a partir de la función de distribución del beneficio marginal (BM), entre cultivos para los que se adquieren o se transfieren derechos de agua, tras una reducción proporcional del 7.29% en el consumo de 2011 ($Q^*=0.88$) en la comunidad V de Riegos de Bardenas



En la siguiente figura 26 se muestran las asignaciones de referencia para los nueve cultivos considerados, cuando no hay restricción alguna de agua ($Q^* = 1$). Y también las que resultarían ante una restricción severa correspondiente a $Q^* = 0.71$, de aplicar la regla proporcional y un mercado sin costes de transacción, equivalente al reparto óptimo. En esta misma figura se representan a su vez los respectivos beneficios del agua de riego por hectárea, BR .

Figura 26. Asignaciones de agua, q , y beneficios del riego, BR , sin restricciones y en aplicación de la regla proporcional y un mercado sin costes de transacción en Riegos de Bardenas V, con el mismo objetivo de reducción del 25% del consumo en 2011 ($Q^*=0.71$)



La siguiente tabla 5 contiene las asignaciones medias y los beneficios medios y agregados del agua de riego que resultan para toda la comunidad: sin restricciones de agua (situación de referencia), en el año 2011 y bajo las dos reducciones manejadas del 7.29% y el 25% con respecto a ese consumo de 2011; esto último, en aplicación de la regla proporcional y de un mercado sin costes de transacción. Esta solución de mercado en la que $C_t = 0$ es la más favorable y coincide con el reparto óptimo. Las diferencias de beneficio que se obtienen son mayores con la mayor de las dos restricciones de agua analizadas. Resulta significativo el hecho de que, para la primera de las restricciones (7.29%; $Q^* = 0.88$), este hipotético mercado no ocasionaría pérdidas de beneficio con respecto a 2011, sino al contrario: con menos agua, se obtiene un mayor margen económico, lo cual indica que ese reparto inicial es mejorable.

Tabla 5. Asignaciones medias y beneficios medios y agregados en Riegos de Bardenas V, sin restricciones de agua y ante reducciones del 7.29% y 25% del consumo de 2011 ($Q^* = 0.88$ y $Q^* = 0.71$), aplicando la regla proporcional y un mercado sin costes de transacción

Escenarios	Asignaciones medias ($m^3 ha^{-1}$)	Beneficio medio del riego ($€ ha^{-1}$)	Beneficio agregado del riego (€)
Ninguna restricción de agua: $Q^* = 1$	8 167	455	6 884 409
Situación en 2011: $Q^* = 0,95$	7 738	451	6.818.266
Reducción para $Q^* = 0,88$:			
Reducción proporcional	7 174	448	6 782 554
Mercado $C_t = 0$ - Reparto óptimo	7 174	451	6 818 743
Reducción para $Q^* = 0,71$:			
Reducción proporcional	5 803	417	6 307 756
Mercado $C_t = 0$ - Reparto óptimo	5 803	430	6 504 525

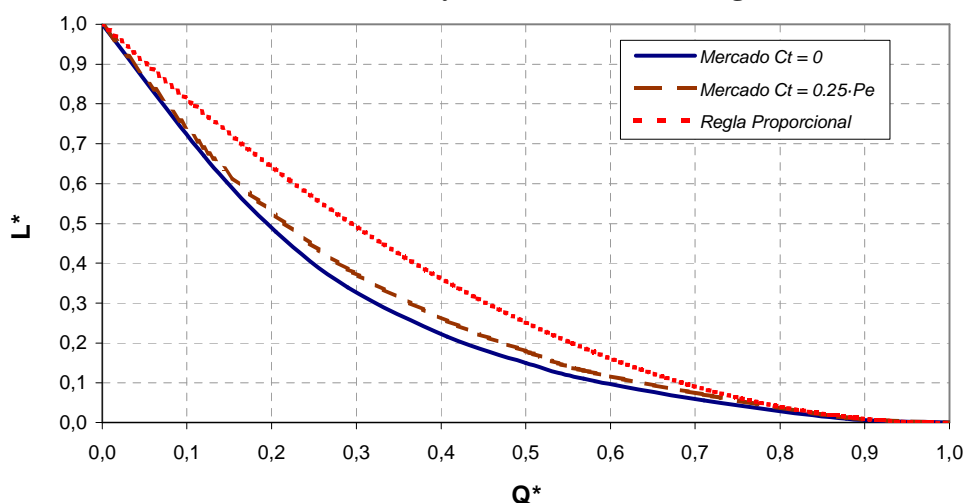
Para este hipotético mercado en el que no existen costes de transacción, las ganancias económicas que se conseguirían con respecto al año 2011, así como la eficiencia económica relativa a la reducción proporcional y al reparto óptimo se muestran en la tercera columna de la siguiente tabla 6 ($C_t = 0$). En un mercado como éste, perfectamente competitivo, sería de aplicación el llamado precio de equilibrio, con costes de transacción nulos ($P_m = P_e$). En las siguientes columnas de la tabla 6 se incluyen los valores que resultan de suponer diversos costes de transacción, C_t , expresados como porcentajes del precio de equilibrio. Como puede verse, incluso con valores muy elevados de C_t , la solución de mercado sería más eficiente que la regla proporcional. Las ganancias del mercado, bajo cada C_t considerado, han sido calculadas restando el correspondiente beneficio al beneficio que se alcanzaría en un mercado sin costes de transacción (36.189 € y 196.918 €).

Tabla 6. Eficiencia y ganancias del mercado, suponiendo diferentes costes de transacción, C_t , con respecto a la regla proporcional y el reparto óptimo, en Riegos de Bardenas V, ante reducciones del 7.29% y 25% del consumo de agua en 2011 ($Q^*=0.88$ y $Q^*=0.71$)

	Costes de transacción						
	%P _e	0	5	10	15	20	25
Reducción para Q* = 0,88	C _i (€ m ⁻³)	0	0,0004	0,0009	0,0013	0,0017	0,0022
	P _m (€ m ⁻³)	0,0087	0,0092	0,0096	0,0100	0,0105	0,0109
Volumen de agua intercambiado	hm ³	4,14	3,59	3,05	2,71	2,58	2,58
Pérdidas relativas al beneficio de 2011	%	- 0,01	0,05	0,11	0,19	0,26	0,35
Eficiencia relativa a la regla proporcional	%	100,53	100,48	100,41	100,34	100,26	100,17
Eficiencia relativa al reparto óptimo	%	100,00	99,94	99,88	99,81	99,73	99,64
Ganancias del mercado	€	36 189	32 318	27 943	23 063	17 679	11 791
Reducción para Q* = 0,71	C _i (€ m ⁻³)	0	0,0011	0,0022	0,0033	0,0043	0,0054
	P _m (€ m ⁻³)	0,0217	0,0228	0,0239	0,0250	0,0260	0,0271
Volumen de agua intercambiado	hm ³	10,99	9,64	8,,28	6,92	5,75	5,56
Pérdidas relativas al beneficio de 2011	%	4,60	4,81	5,06	5,36	5,71	6,10
Eficiencia relativa a la regla proporcional	%	103,12	102,81	102,62	102,30	101,92	101,50
Eficiencia relativa al reparto óptimo	%	100,00	99,70	99,51	99,20	98,84	98,42
Ganancias del mercado	€	196 918	177 083	165 258	144 762	121 153	94 434

Como se puede observar, los resultados son sensibles no sólo a los costes de transacción, sino también a la magnitud de las restricciones de agua. La eficiencia del mercado con respecto a la regla proporcional, al igual que las ganancias que del mismo pueden obtenerse, son, hasta un cierto punto, mayores cuanto más severa es la restricción. Si la restricción no es severa, el incremento de pérdidas con respecto al beneficio de referencia (L^*) es poco significativo. Esto puede observarse en la siguiente figura 27. En el peor de los dos casos analizados, cuando C_t equivale al 25% de P_e , el mercado aún seguiría siendo más eficiente que la regla proporcional y alcanzaría casi la eficiencia del reparto óptimo.

Figura 27. Pérdidas relativas al beneficio de referencia, L^* , según el agua disponible, Q^* , con un mercado sin costes de transacción y $C_t = 25\%$ de P_e , en Riegos de Bardenas V



De acuerdo con Colby *et al* (1989), en los mercados de agua de los estados de Colorado, Nuevo México y Utah, los costes de transacción se cifraron, por término medio, en un 6% de los precios pagados por los derechos del agua. En Chile, los costes de transacción son bastante bajos en los regadíos modernizados y en aquellas comunidades de riego que están consolidadas: incluyendo el transporte del agua, se estiman entre un 2 y un 5% del precio de mercado; y representan en torno al 10% de las ganancias brutas obtenidas de las transacciones realizadas (Hearne y Easter, 1995). Como puede apreciarse en la tabla 7, en nuestro estudio de caso, unos costes de transacción equivalentes al 5% del precio de mercado, P_m (segunda columna), supondrían una pérdida de en torno el 5% de las ganancias brutas, G_m . Tanto para $Q^* = 0.88$ como para $Q^* = 0.71$, para perder un 10% de G_m , los costes de transacción deberían representar aproximadamente un 9% de P_m . Por lo tanto, en comparación con los de Chile, podríamos decir en primera aproximación, que el mercado de agua simulado en la comunidad V de Riegos de Bardenas podría considerarse bastante competitivo.

Tabla 7. Costes de transacción, C_t , expresados por m^3 de agua transferida y como porcentajes del precio de equilibrio, P_e , el precio de mercado, P_m , y las ganancias del mercado, G_m , en Riegos de Bardenas V, para reducciones del 7.29% y 25% del consumo de agua en 2011 ($Q^* = 0.88$ y 0.71)

C_t (% P_e)	C_t (% P_m)	C_t (€ m^{-3})		G_m (€ m^{-3})		C_t (% G_m)	
		$Q^* = 0,88$	$Q^* = 0,71$	$Q^* = 0,88$	$Q^* = 0,71$	$Q^* = 0,88$	$Q^* = 0,71$
0	0,00	0,0000	0,0000	0,0087	0,0179	0,00	0,00
5	4,76	0,0004	0,0011	0,0090	0,0203	4,86	5,34
10	9,09	0,0009	0,0022	0,0092	0,0200	9,53	10,87
15	13,04	0,0013	0,0033	0,0085	0,0209	15,39	15,55
20	16,67	0,0017	0,0043	0,0068	0,0211	25,55	20,59
25	20,00	0,0022	0,0054	0,0046	0,0170	47,90	31,92

5.3.5. Discusión

Como se ha visto, el mercado simulado alcanza la eficiencia económica de la regla del reparto óptimo, siempre y cuando los costes de transacción sean nulos. Este resultado era de esperar, puesto que un problema matemático, como el formulado para la determinación del reparto óptimo, si está bien planteado, tiene una solución única; y, por tanto, esta solución no puede ser mejorada, a no ser que se modifique el problema. Así pues, el reparto óptimo no dejaría lugar a mejora alguna por el mercado, a no ser que en la formulación del problema de optimización no se hubiera reflejado adecuadamente algún aspecto substancial. Entre los aspectos no considerados en el presente estudio, podrían tener una influencia importante los calendarios de cultivo y la estacionalidad de las lluvias.

Los resultados obtenidos dependen claramente de los valores de referencia que sean tomados para las dotaciones, q_r , y los beneficios del agua de riego, BR_r . Estos valores difícilmente coincidirán dentro de una zona regable. Cuando no se disponen de datos específicos, una aproximación a la variabilidad de esos valores de referencia podría hacerse diferenciando índices o clases de producción, tal como se hace en el Catastro, pero esto únicamente afectaría a los valores BR_r . Un análisis de sensibilidad en la determinación de las asignaciones de agua, bajo condiciones de incertidumbre, se ha desarrollado en el punto 5.2.5, para la misma comunidad de riego de *Riegos de Bardenas V*. En concreto, se ha hecho que, para cada uno de sus nueve cultivos, los respectivos valores de q_r y BR_r sean las medias de sendas distribuciones normales, que tengan como coeficientes de variación $CV_{q_r} = 0.15$ y $CV_{BR_r} = 0.30$. Con ambos CV , se han obtenido tres valores de q_r y tres de BR_r , a saber: $[q_r \cdot (1 - CV_{q_r}), q_r, q_r \cdot (1 + CV_{q_r})]$ para q_r y $[BR_r \cdot (1 - CV_{BR_r}), BR_r, BR_r \cdot (1 + CV_{BR_r})]$ para BR_r . Su combinación proporciona nueve tipos o clases para cada cultivo. Para determinar la superficie de cada tipo, se les han asignado las correspondientes probabilidades de la distribución binormal: 0.204 para (q_r, BR_r) , 0.075 para $(q_r \cdot (1 \pm CV_{q_r}), BR_r \cdot (1 \pm CV_{BR_r}))$, 0.124 para $(q_r \cdot (1 \pm CV_{q_r}), BR_r)$ y $(q_r, BR_r \cdot (1 \pm CV_{BR_r}))$. Cuanto mayor sea CV_{q_r} y CV_{BR_r} , mejores serán los resultados obtenidos, en el sentido de que las pérdidas agregadas de la comunidad de riego serán menores. Como consecuencia, los datos que se manejen deberían ser los más precisos posibles.

5.3.6. Conclusiones

En este trabajo se ha visto que la regla del reparto óptimo y el mercado pueden mejorar la eficiencia de asignación del agua de riego. En un contexto en el que se cumplan ciertos requisitos, como que haya muchos compradores y vendedores, que la información sea completa, que los costes de transacción sean nulos o que no se regatee el precio, el reparto de agua al que se llegue con el mercado será el óptimo, independientemente de la asignación inicial. Desde esta perspectiva, el reparto inicial no influye en el final, porque la solución óptima es única e independiente de aquel; pero sí influye en el volumen negociado en el mercado, en el número de transacciones, en el precio de equilibrio y en el beneficio conjunto de los regantes. Allí donde la asignación de agua pueda considerarse eficiente, cercana al óptimo, los derechos que se reasignen, en respuesta a una diferente disponibilidad o un diferente valor productivo del agua, no serán muchos, por lo general.

Tanto la regla del reparto óptimo como el mercado son mucho más eficientes que la regla de reducción proporcional, la cual, a pesar de ello, es la que más se emplea en los colectivos de riego. Las pérdidas que resultan de la aplicación de una u otra pueden ser más o menos importantes, dependiendo de las características de la comunidad de riego y la gravedad de la escasez de agua. Las mayores diferencias surgirán cuando se tengan en cuenta o se discriminen los diferentes factores técnicos, económicos y ambientales de las explotaciones. Sólo cuando todos los usuarios sean idénticos, dispongan de asignaciones elevadas y precios del agua reducidos, la regla proporcional podrá considerarse económicamente eficiente. Sin embargo, ante restricciones moderadas o graves y/o precios elevados del agua, deberán promoverse otras fórmulas de reparto que sigan criterios de eficiencia económica, con el fin de equilibrar los diferentes intereses de los agricultores.

La regla del reparto óptimo permite aplicar cualquier restricción de agua a un coste mínimo para el conjunto de la comunidad objetivo. Sus niveles de eficiencia podrían ser tales, que no haya mecanismo alguno de mercado capaz de mejorarla. Además, el reparto óptimo no conlleva costes de negociación, y las economías de escala podrían hacer que se redujeran los costes administrativos en sistemas suficientemente grandes. Sin embargo, su aplicación exige un conocimiento preciso del agua utilizada y los beneficios que de la misma obtienen los regantes; de existir información asimétrica o incertidumbre en estos parámetros, no se llegará al óptimo. En el marco de una comunidad de regantes tan grande como la estudiada, seguramente habría diferencias importantes en los volúmenes aplicados y los beneficios obtenidos de cada cultivo. Esta supuesta heterogeneidad invita a considerar un mayor número de usos y beneficios que los considerados en el presente trabajo. Si las autoridades tuviesen la información necesaria para caracterizar todos los usos de acuerdo con la realidad, estarían en condiciones de aplicar la regla del reparto óptimo con garantías. Las dificultades para medir con precisión esas variables esenciales suscitan la búsqueda de procedimientos para eludir la incertidumbre, lo cual probablemente sea más fructífero.

En cambio, el mercado genera por sí mismo buena parte de esa información necesaria para hacer un reparto económicamente eficiente del agua. Esta es una importante ventaja, sobre todo cuando dicha información no puede ser obtenida a un coste razonable, cuando está fragmentada y dispersa entre los actuales y potenciales usuarios, y cuando son cambiantes las condiciones de oferta y demanda y el valor del agua. Esto es especialmente útil en zonas en las que hay diversidad de usos, en las que puede ser difícil reunir todos los datos necesarios para aplicar

con garantías la regla del reparto óptimo, pero en las que, sin embargo, cabría esperar una alta participación en un mercado de agua y un elevado número de transacciones, lo cual redundaría en un reparto eficiente.

El estudio de caso ha puesto de relieve que, con unos costes de transacción moderados, de hasta un 10% del precio de equilibrio, con el mercado se alcanza casi la máxima eficiencia, y que ésta no se desvirtuaría mucho incluso con C_t superiores. No obstante, la regla del reparto óptimo será preferible cuando los C_t sean lo suficientemente elevados. También se ha visto que unos costes de transacción del orden del 5% permiten obtener casi las mismas eficiencias que con C_t nulos. Esta circunstancia es interesante, ya que informa de la existencia de un margen útil para poder financiar la organización de un mercado de agua. Por otro lado, una mayor escasez de recursos hídricos hace que sean también mayores las ganancias del mercado, con respecto a los costes de transacción. Así pues, los mercados de agua serán más activos allí donde y cuando los recursos sean escasos y, por lo tanto, valiosos. Las transacciones se verán favorecidas por las diferencias en el valor productivo del agua, las cuales deben ser lo suficientemente grandes como para compensar los costes de obtenerla a través del mercado.

Dado que el precio y el reparto de agua al que se llegue con un mercado no pueden ser precisados con total exactitud -aunque puedan ser estimados, como aquí se ha hecho-, los efectos del mismo difícilmente pueden ser conocidos de antemano. En general, no hay ninguna razón particular para esperar que un mercado o incluso la regla óptima, aunque proporcionen la mayor eficiencia económica, den lugar necesariamente a un reparto equitativo del agua o introduzcan algún criterio de equidad en la distribución final de beneficios dentro de una comunidad de regantes. En la medida en que la transferencia de derechos se asocie con unas ciertas externalidades, será necesario garantizar que los precios de mercado no se desvíen del verdadero coste de oportunidad de agua, y que dicho coste no lo tenga que pagar la sociedad en su conjunto. El criterio de eficiencia económica exige pues que todos los costes y beneficios asociados a las decisiones de uso y cesión sean contabilizados. De otro modo, una transferencia podría resultar beneficiosa para las partes interesadas, pero ineficiente desde un punto de vista social.

Mientras la equidad y algunos otros valores sociales o públicos relacionados con el uso del agua sean una parte importante de las políticas hidrológicas, puede ser conveniente optar por algún tipo de regulación gubernamental, de una manera tal que las restricciones sociales y

ambientales puedan ser añadidas en la regla del reparto óptimo, y también en los mercados, a fin de limitar las posibles externalidades. Desde el punto de vista de la eficiencia económica, los titulares de los derechos al uso del agua deberían hacer frente a los costes sociales de sus acciones, por lo que sus efectos o consecuencias deberían ser tenidos en cuenta en toda decisión de reasignación. Estas cuestiones por lo general pueden ser integradas en las reglas de reparto y en un mercado, por ejemplo, reservando derechos para un cierto fin, recaudando impuestos sobre los usos que causan externalidades negativas o subsidiando aquellos otros que generan externalidades positivas. En consecuencia, resulta esencial contar con una información hidrológica fiable y conocer bien cuáles son estas externalidades.

6. EFICIENCIA Y RENTABILIDAD DE LA MODERNIZACIÓN DE REGADÍOS

6.1. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN PROYECTO DE MODERNIZACIÓN

Artículo “Evaluación de la eficiencia de un proyecto típico de modernización de regadíos”.
Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros n.º 230, 2011 (119-145).

Autor: Javier Alarcón.

6.1.1. Introducción

El agua es un factor clave en la agricultura de muchas regiones, generando el regadío gran parte de la producción final agraria y del empleo en este sector, muy especialmente en regiones áridas con escasez de recursos. La expansión del regadío en años precedentes, con políticas de regulación y de transformación de secanos en regadíos, se ha visto frenada en favor de los planes de modernización de regadíos, ante unas dificultades crecientes para extraer nuevos volúmenes de agua. En un contexto de escasez creciente, acentuada por las desfavorables predicciones climáticas, resulta oportuno introducir criterios económicos en la gestión del agua, que ayuden a buscar los usos más eficientes, en la medida en que se pueda conseguir una misma producción con un menor consumo. Las pérdidas de agua en las redes de riego y su deficiente control y regulación son factores que ahondan en la conveniencia de promover infraestructuras y sistemas de riego eficientes.

El Plan Nacional de Regadíos propugna un marco de actuaciones al servicio de un desarrollo sostenible del medio rural, de una política coherente de ordenación de producciones y mercados y de la gestión eficiente de un recurso escaso como es el agua. Como principios y directrices generales, señala la ordenación de las producciones y los mercados agrarios y la mejora de las infraestructuras de distribución y aplicación del agua de riego. El Plan Nacional de Regadíos concibe la gestión del agua para el riego como un proceso continuo, que recorre un largo camino desde el embalse o acuífero hasta la planta. En este proceso existen múltiples oportunidades para mejorar la productividad de los recursos empleados, pero, por su gran complejidad, se exige la aplicación de métodos integradores, sin los cuales resulta imposible

encontrar la combinación de las actuaciones más eficaces para cada circunstancia y disponibilidad presupuestaria (MAGRAMA, 2012).

El Programa A.G.U.A., de Actuaciones para la Gestión y la Utilización del Agua, viene a materializar esta reorientación de la política del agua, promoviendo una mayor disponibilidad y una mejor calidad de los recursos hídricos en cuencas con déficit o con graves problemas de sobreexplotación y contaminación de acuíferos. Para ello, incorpora un conjunto de actuaciones dirigidas a la generación de recursos no convencionales, a la optimización y mejora de la gestión del agua, a la prevención de inundaciones y a la depuración (MMA, 2003; BOE, 2001a). Con este programa se promueve un suministro de agua, en cada caso, con el menor coste económico posible, incrementando la eficiencia en su uso y potenciando medidas de ahorro y la reducción del consumo al estrictamente necesario para cada actividad. Sus actuaciones deben minimizar el coste económico por metro cúbico de agua y maximizar la rentabilidad, trasladando el ahorro obtenido a los beneficiarios de esas actuaciones.

En un mismo sentido, el Plan de Choque para la mejora y consolidación de regadíos (BOE, 2006) concretó la modernización de regadíos en un amplio programa de actuaciones, con las que lograr un ahorro significativo de agua. Estas actuaciones van dirigidas a las redes de transporte, tanto en cabecera (alta) como en parcela (baja), de zonas regables poco eficientes en el uso del agua pero con un importante número de agricultores. Contemplan la reparación de elementos dañados y la sustitución de los obsoletos, así como la racionalización del trazado de las redes y el cambio de los sistemas de aplicación por otros de mayor eficiencia.

6.1.2. Métodos

El análisis coste-eficacia se utiliza mucho para determinar la eficacia de una medida o un proyecto que conlleva un beneficio social o ambiental, considerando la eficacia en términos físicos de los logros que se consiguen con aquél. Resulta entonces un instrumento muy útil para determinar si el coste es o no desproporcionado con respecto al objetivo a conseguir. Como se señala en la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) (BOE, 2008), “el análisis coste-eficacia será un instrumento a tener en cuenta para la selección de las medidas más adecuadas para alcanzar los objetivos ambientales de las masas de agua, así como para analizar las medidas alternativas en el análisis de costes desproporcionados”.

Como también se detalla en la IPH, el coste de las medidas de planificación es el de todos los elementos que la integran, mientras que la eficacia es un valor indivisible asociado a la medida en su conjunto. El coste de las medidas se expresará como coste anual equivalente, excluidos impuestos, incluyendo los costes de inversión, los costes de explotación y mantenimiento, los costes sociales y ambientales y los costes indirectos. La Instrucción añade que el coste de las medidas se valorará a precios constantes, indicándose el año de referencia y especificándose la tasa de descuento utilizada para el cálculo de la anualidad.

Tomando un proyecto de modernización, el cual se detalla en el siguiente epígrafe, se ha planteado la estructura de gastos e ingresos que resultaría de implementarlo, así como la correspondiente a la situación inicial. Esto se ha hecho, por un lado, para la Administración hidráulica, y por otro, para los regantes afectados. Después, se han adoptado las producciones que son consideradas, para ambas situaciones, en el correspondiente informe de viabilidad del proyecto (MARM, 2010), las cuales quedan recogidas en la tabla 9. Por último, se ha estimado el agua que se consumiría una vez fuera ejecutado dicho proyecto, a partir de los rendimientos de riego esperados (tabla 8)⁹, los volúmenes de agua aplicados y los volúmenes netos requeridos (tabla 9). Esto último se ha hecho bajo ocho escenarios, los cuales surgen de considerar las siguientes posibilidades:

- i)* el mantenimiento de la distribución original de cultivos o la reordenación que se contempla en el informe de viabilidad del proyecto, sin variación de superficie total pero sí de la superficie ocupada por cada uno de esos cultivos (ver tabla 9)
- ii)* el ajuste o no de las dotaciones de agua a las necesidades brutas o teóricas de esos cultivos (necesidades de riego netas divididas por la eficiencia de aplicación de riego)¹⁰
- iii)* el cambio o no del sistema de aplicación del riego en parcela

1. Escenarios sin cambio en la distribución original de cultivos:

⁹ La eficiencia técnica de un regadío se calcula como el producto de las eficiencias de conducción primaria, de distribución secundaria y de aplicación en parcela. Este producto equivale a la eficiencia global de riego que la FAO (1977) define como la relación entre el agua añadida a la rizosfera y la cantidad total suministrada a la zona regable.

¹⁰ De conformidad con la definición dada por la FAO (1977), por “necesidades brutas de riego” se entiende la evapotranspiración, excluida la contribución de las precipitaciones, la de las aguas subterráneas, la del agua almacenada en el suelo y la de las aguas de circulación superficial, que se requiere para la producción normal del cultivo, más las pérdidas de agua y el agua desperdiciada en las operaciones de riego.

Escenario 1A: Se mantiene la distribución de cultivos, se mantienen los consumos de agua iniciales en parcela y el regante no cambia de sistema de aplicación de riego

Escenario 1B: Se mantiene la distribución de cultivos, se ajustan los consumos de agua en parcela a las necesidades teóricas y el regante no cambia de sistema de aplicación

Escenario 1C: Se mantiene la distribución de cultivos y los consumos de agua iniciales en parcela y el regante sí cambia de sistema de aplicación de riego

Escenario 1D: Se mantiene la distribución de cultivos, se ajustan los consumos de agua en parcela a las necesidades teóricas y el regante sí cambia de sistema de aplicación

2. Escenarios con reordenación de cultivos:

Escenario 2A: Se cambia la distribución original de cultivos, se mantienen los consumos de agua iniciales en parcela y el regante no cambia de sistema de aplicación de riego

Escenario 2B: Se cambia la distribución de cultivos, se ajustan los consumos de agua a sus necesidades teóricas y el regante no cambia de sistema de aplicación

Escenario 2C: Se cambia la distribución original de cultivos, se mantienen los consumos de agua iniciales y el regante sí cambia de sistema de aplicación

Escenario 2D: Se cambia la distribución original de cultivos, se ajustan los consumos de agua a sus necesidades teóricas y el regante sí cambia de sistema de aplicación

Para los ocho escenarios se ha podido calcular el valor actual o presente neto (VPN) de la inversión, como medida de la ganancia que proporcionaría el proyecto al regante, sin pérdidas para la Administración gestora. A su vez, se ha estimado el consumo de agua en cada caso y el ahorro consiguiente, entendido éste como la disminución de volúmenes demandados en cabecera de la red, con respecto a la situación inicial. La relación entre la ganancia privada en los veinticinco años de vida útil considerados para el proyecto y el consumo de agua previsto en ese tiempo, informa sobre la productividad del agua. No obstante, esta ganancia no se deriva exclusivamente del agua, pues intervienen otros factores de producción. Dicha relación responde al concepto de *productividad aparente neta del agua* dado por Rodríguez Ferrero *et al* (2008), el cual resulta de dividir el valor de la producción bruta por hectárea, descontados

los costes de explotación, por el volumen de agua que es suministrada. La misma ha sido utilizada en varios trabajos. Así, por ejemplo, Navarro *et al* (2007) obtienen que la productividad de cuatro zonas regables se aleja bastante de la que se podría lograr si se aplicase el volumen de agua que requiere cada cultivo para satisfacer sus necesidades teóricas, siempre y cuando el agua tuviese un coste moderado¹¹.

Por otro lado, en el presente estudio se ha calculado un índice *coste-eficacia*, como cociente entre el coste anual equivalente de la modernización y la mejora conseguida con la misma. Concretamente, se ha tomado para el coste la suma de la inversión total (tanto en el proyecto de modernización, como, si cabe, en la instalación del nuevo sistema de aplicación en parcela), los costes de mantenimiento o conservación de las nuevas instalaciones (por reposiciones, reparaciones y limpiezas), así como el incremento de los costes de explotación y funcionamiento. Todos ellos han sido anualizados, de acuerdo con la vida útil del proyecto, a una tasa de descuento del 4%. Como mejora, se contempla la posible reducción en el volumen demandado en cabecera de la red, a consecuencia de la materialización del proyecto de modernización y durante toda su vida útil.

6.1.3. Estudio de caso

Se ha utilizado como estudio de caso el *Proyecto de modernización de la zona regable del Genil, margen izquierda, segunda fase, en el término municipal de Palma del Río (Córdoba)* (CHG, 2009). La actuación consiste en la sustitución de un sistema de riego por gravedad por otro de riego por goteo, que afecta a una extensión de 1.205 ha. Se prevé regar a la demanda, con una facturación por volumen y momento de consumo.

Se contempla el entubamiento de la red de riego, con tuberías de acero, PVC y polietileno, en una longitud de 51.930 m, para un caudal de $1,37 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La red se abastece de una conducción de acero, conectada a la toma. A lo largo de toda la red se colocan válvulas de mariposa, de compuerta, de ventosa y válvulas aductoras, para seccionamiento, derivación, protección y control de sobrevelocidad. Se disponen 136 arquetas de reparto. El proyecto comprende a su vez una estación de filtrado a la salida de una balsa (la cual fue construida en una primera

¹¹ En Montijo (Badajoz) se obtiene un valor medio de productividad de $0,17 \text{ € m}^3$, pero se podría llegar a $0,27$, si se ajustase el riego a las necesidades teóricas. En Burriana (Castellón) se podría pasar de $0,12$ a $0,29 \text{ € m}^3$; y en la Margen Izquierda del Porma (León), de $0,19$ a también $0,29 \text{ € m}^3$. Sin embargo, en Adra (Almería) se obtienen $4,39 \text{ € m}^3$, casi lo mismo que si se aportasen los volúmenes teóricos ($4,47 \text{ € m}^3$).

fase), así como la instalación de equipos de telecontrol, con comunicación por radiofrecuencia, alimentados por energía solar.

Con este proyecto se prevé aumentar la producción y rentabilidad de las explotaciones, tal y como sucediera en la zona previamente modernizada en una primera fase. En el informe de viabilidad del proyecto (MARM, 2010) se contempla la sustitución parcial de cultivos tradicionales (algodón y maíz) por cultivos permanentes (naranjos y hortícolas). Las previsiones de aumento de los rendimientos o la eficiencia del riego se dan en la tabla 8. Para una mayor simplicidad, el origen del agua se ha supuesto 100% superficial. Con ello se presupone una mayor demanda, si aceptamos la idea extendida, aunque no siempre válida, de que el transporte de agua superficial suele ser menos eficiente que el de agua subterránea.

Aunque los datos que han permitido llevar a cabo este estudio provienen mayormente del proyecto (CHG, 2009), así como de su informe de viabilidad (MARM, 2010), también han sido utilizadas otras fuentes complementarias que se van señalando en el texto.

Tabla 8. Estimación del cambio en la eficiencia global de transporte del agua

Eficiencia sin proyecto (%)		Eficiencia con proyecto (%)		Incremento de eficiencia (%)	
en alta	en baja	en alta	en baja	en alta	en baja
85	69	95	85	10	16
59%		81%		22%	

Notas: La eficiencia en baja inicial resulta de suponer que en la zona de estudio se está regando con un exceso del 31% con respecto a las necesidades teóricas, de acuerdo con Junta de Andalucía (2002).

Para una mayor simplicidad en el estudio, se ha supuesto que el origen del agua en las situaciones sin y con proyecto es enteramente superficial.

Fuente: Elaboración propia, a partir de Berbel *et al* (2007b), Strosser *et al* (2007) y Luján (1992).

Tabla 9. Estimación de producción y agua requerida, ante una reorientación de cultivos en la zona regable del Genil, M.I.

CULTIVOS	DISTRIBUCION ORIGINAL DE CULTIVOS						DISTRIBUCION PREVISTA DE CULTIVOS						VARIACION		
	Superficie		Producción		Volumen neto de agua requerido		Superficie		Producción		Volumen neto de agua requerido		Superficie %	Producción %	Agua %
	ha	%	10 ³ kg	%	10 ³ m ³ año ⁻¹	%	ha	%	10 ³ kg	%	10 ³ m ³ año ⁻¹	%			
Algodón	460	38,17	1 932	7,64	2 411,66	43,43	155	12,86	775	1,35	812,63	15,27	-66,30	-59,89	-66,30
Maíz	355	29,46	4 615	18,24	1 463,40	26,36	85	7,05	1 275	2,22	350,39	6,59	-76,06	-72,37	-76,06
Frutales (naranjos)	340	28,22	17 000	67,20	1 533,34	27,61	845	70,12	50 700	88,10	3 810,79	71,63	+148,53	+198,24	+148,53
Hortícolas	50	4,15	1 750	6,92	144,24	2,60	120	9,96	4 800	8,34	346,17	6,51	+140,00	+174,29	+140,00
Totales	1 205	100	25 297	100	5 552,64	100	1 205	100	57 550	100	5 319,98	100	0,00	+ 127,50	- 4,19

Nota: No se considera el ajuste de dotaciones de riego a las necesidades teóricas, ni la mejora de eficiencia en el transporte de agua que se derivaría de la modernización de la zona regable.

Fuente: Elaboración propia, a partir de MARM (2010) y CEDEX (1988).

6.1.3.1. Gastos del proyecto

Se han estudiado los gastos e ingresos a que da lugar el referido proyecto, tanto para el regante como para la Administración. En las tablas 10 y 11 se refleja la estructura prevista de gastos e ingresos para el regante, tanto en la situación inicial –*escenario 0*, sin proyecto- como en la final -con proyecto, bajo el *escenario 2C*, que se demostrará más favorable.

Los gastos se dividen en dos grupos: los de explotación no atribuibles al agua y los relacionados con la utilización de este recurso. Los primeros se obtienen teniendo en cuenta datos medios del regadío de la Cuenca del Guadalquivir, tomados de Junta de Andalucía (2002), EPDAP (2005) y Rodríguez Ferrero *et al* (2008). Los segundos se han diferenciado en cuatro tipos: inversión y amortización, conservación y mantenimiento, explotación o funcionamiento y administración o gastos generales, y han sido tomados mayormente de CHG (2009) y MARM (2010).

Los gastos de inversión se refieren a la construcción de las obras proyectadas, las expropiaciones necesarias y la reposición de servicios afectados. Como viene siendo habitual en este tipo de proyectos, inicialmente los regantes costean el 25% de las obras, corriendo a cargo de la Administración el 75% restante (parte del cual luego recupera, a través de la tarifa del agua). Estos gastos se repercuten en realidad a lo largo del plazo de ejecución de las obras, y se distribuyen en tres anualidades. No obstante, para una mayor simplicidad, y dado que los resultados apenas variarían, consideraremos un único año (0) para el desembolso de la totalidad de la inversión, incluyendo la sustitución del sistema de aplicación en parcela, que debe costear el regante.

El presupuesto de ejecución por contrata del proyecto asciende a 14.589 €₂₀₀₅ ha⁻¹ (con gastos generales, beneficios industriales e IVA). El capítulo principal de este proyecto, que con diferencia más peso tiene, es el de entubamiento de la red, pues representa casi el 73% del total del presupuesto. La nueva estación de filtrado no llega al 10%. Los sistemas de telecontrol y automatismos y la reposición de servicios suponen en torno a un 7,5% cada uno. Las medidas correctoras y de seguridad y salud apenas suman el 2%.

Los gastos de explotación y mantenimiento iniciales, que comprendían los de impulsión, reparaciones y limpiezas, ascendían a 45 € ha⁻¹ año⁻¹, de acuerdo con MARM (2010). Los

gastos de administración del organismo gestor, según la citada fuente, fueron de 20,30 € hā¹ en el año 2005, y se considera no experimentan variación en la situación con proyecto. Los gastos de conservación y mantenimiento de las obras realizadas se estiman en un 1,2% de la inversión, de acuerdo con MIMAM (2000). Los gastos de explotación o funcionamiento, debidos principalmente al consumo de energía, han sido estimados adoptando para el volumen demandado de agua un coste unitario de 0,023 € m³, similar al que toma Rodríguez Díaz (2003) y coherente con los valores observados en ciertas zonas regables.

Por último, se incluye en la situación sin proyecto el coste resultante de imputar el valor medio del canon de regulación para los diferentes usos del agua; de modo tal que, al sumarse a las cantidades atribuibles a los gastos de administración, funcionamiento y conservación imputables a las infraestructuras hidráulicas, se obtenga el coste agregado del agua que registra la Junta de Andalucía (2002), actualizado a 2005. En situación con proyecto, este canon o tasa se calcula de manera que permita a la Administración recuperar el 100% de su parte de inversión y no incurrir en pérdidas con respecto a la situación inicial. El coste final del agua resulta de dividir la suma de todos los costes mencionados entre el volumen utilizado.

6.1.3.2. Ingresos del proyecto

Para los escenarios en los que se mantienen los cultivos iniciales, se han tomado los ingresos medios que se dan, para el regadío de la Cuenca del Guadalquivir, en Junta de Andalucía (2002), EPDAP (2005) y Rodríguez Ferrero *et al* (2008). En los otros escenarios en los que hay reordenación de cultivos, la superficie final de éstos es la que se contempla en el informe de viabilidad del proyecto (MARM, 2010). Tomando entonces los mismos rendimientos que allí se barajan, se ha determinado el previsible incremento de producción (ver tabla 9). De acuerdo con MARM (2010), el funcionamiento de la primera fase modernizada corrobora estas estimaciones y, además, se han implantado fábricas en la zona que demandan esos productos. En cuanto a los beneficios de explotación, se ha optado sin embargo por tomar unos valores más modestos que los allí considerados; en concreto, los datos medios que registran, para el regadío de la Cuenca del Guadalquivir, Rodríguez Ferrero *et al* (2008).

Para la Administración, los ingresos previstos provienen del cobro de la tarifa de utilización del agua. Ésta se regula en el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001b), en el cual se distinguen tres componentes: *i*) el total previsto de gastos de funcionamiento y conservación de

las obras realizadas; *ii*) los gastos de administración del organismo gestor imputables a dichas obras; y *iii*) el 4 por 100 del valor de las inversiones realizadas por el Estado, debidamente actualizado, teniendo en cuenta la amortización técnica de las obras e instalaciones y la depreciación de la moneda¹². El cálculo de esta amortización se ha hecho según se recoge en dicha ley, si bien, aunque allí se fijan 25 anualidades como duración de la obligación de su pago, se ha supuesto un periodo de carencia en los 7 primeros años.

6.1.3.3. Beneficios y costes ambientales

La sustitución de riego por gravedad por riego localizado tiene otros beneficios ambientales, aparte de la probable reducción de las demandas de agua, como se vio en el epígrafe 1.3. Al disminuirse la escorrentía superficial, se incrementa la absorción del agua sobrante del riego por los niveles edáficos superficiales y se reduce la percolación a los niveles freáticos de las aguas subterráneas. Se disminuye en consecuencia el aporte de productos agroquímicos y de compuestos como los nitratos y los fosfatos, a las masas de agua cercanas.

Sin embargo, pueden darse casos en los que, ante unas menores pérdidas de agua en la red de riego o también un mayor consumo, disminuyan los retornos a la salida de la zona regable. Ello afectaría negativamente a las masas de agua y a los usuarios que los vienen utilizando. Por añadidura, los proyectos de entubación, como el que aquí se maneja, afectan negativamente a la vegetación hidrófila y a los hábitats que los regadíos tradicionales suelen albergar. Éstos contribuyen a articular el paisaje, al circular el agua por sus acequias, cuando los cauces están prácticamente secos (ESTEPA, 2010). Estas externalidades no han sido valoradas.

Por su parte, el incremento en el consumo de energía que conlleva el cambio de riego por gravedad a riego a presión ocasiona un coste ambiental, que puede ser más o menos elevado, dependiendo del tipo de fuente energética utilizada y de las exigencias de presión y caudal. Así ha quedado reflejado en algunos trabajos¹³ y también en el presente, en el cual, para un coste medio de 0,023 € m³, se han obtenido en la mayoría de los escenarios unos incrementos de costes energéticos de más del 100%.

¹² El importe de las inversiones incluirá los gastos motivados por la redacción de proyectos, la construcción de las obras principales y complementarias, las expropiaciones o indemnizaciones necesarias y, en general, todos los gastos de inversión, sean o no de primer establecimiento.

¹³ Rodríguez Díaz (2003) calcula para varias zonas regables de Andalucía unos gastos en energía que van de los 40 € ha¹ año⁻¹, en zonas en las que se riega mayormente por gravedad, hasta los 400 € ha¹ año⁻¹, en aquellas en las que hay redes a presión y se precisa mucha elevación.

Con respecto al cumplimiento de los requisitos que para la realización de nuevas actuaciones establece la Directiva Marco del Agua, en el informe de viabilidad del proyecto (MARM, 2010) se considera que el mismo no afecta al buen estado de las masas de agua, ni da lugar a su deterioro. Y que se interviene directamente, mejorando la gestión del agua en la zona regable, compatibilizando su uso con su conservación. En este mismo sentido se pronunció la Dirección General para la Biodiversidad, al confirmar con fecha 25 de enero de 2006, que la actuación no produce afecciones sobre espacios incluidos en la Red Natura; y también la Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y del Cambio Climático, al emitir con fecha 12 de mayo de 2006, la Resolución por la que se adopta la decisión de no someter a evaluación de impacto ambiental el proyecto.

Tabla 10. Demanda y coste del agua, beneficios de explotación, valor presente neto y productividad del agua en la situación inicial (sin proyecto), para el regante. U.M.: euros de 2005. Leyenda en página siguiente

Año	T_A (€ m ⁻³) ¹	C_A (€ m ⁻³)	$D_{A\ b}$ (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)	I (€ ha ⁻¹ año ⁻¹)	G_{NA} (€ ha ⁻¹ año ⁻¹)	$G_{A\ t}$ (€ ha ⁻¹ año ⁻¹)	$G_{A\ mc} + G_{A\ ef}$ (€ ha ⁻¹ año ⁻¹)	$G_{A\ sg}$ (€ ha ⁻¹ año ⁻¹)	$\sum G_A$ (€ ha ⁻¹ año ⁻¹)	B (€ ha ⁻¹ año ⁻¹)
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0,025	0,039	4 608	3 148	1 647	115	45	20	180	1 360
2	0,025	0,039	4 608	3 148	1 647	115	45	20	180	1 360
...
25	0,025	0,039	4 608	3 148	1 647	115	45	20	180	1 360

Productividad del agua² en parcela: 0,18 € m⁻³
Productividad del agua² en cabecera: 0,16 € m⁻³
VPN = 21 240 € ha⁻¹

¹⁾ T_A se corresponde con el valor medio del canon de regulación para los diferentes usos. Sumando a éste las cantidades atribuibles a los gastos de administración, funcionamiento y conservación, se obtiene el coste agregado del agua para el regante, C_A

²⁾ Es la productividad aparente neta del agua, a lo largo de toda la vida útil del proyecto. Se calcula dividiendo el VPN por la demanda de agua durante ese tiempo: $P_A = \text{VPN} / (25 \cdot D_A)$

Fuente: Elaboración propia, a partir de Junta de Andalucía (2002), EPDAP (2005) y Rodríguez Ferrero *et al* (2008).

Tabla 11. Demanda y coste del agua, beneficios de explotación, valor presente neto y productividad del agua bajo el escenario 2C (con proyecto), para el regante. U.M.: euros de 2005. Leyenda en página siguiente

Año	T_A (€ m ⁻³) ¹	C_A (€ m ⁻³)	$D_{A\ b}$ (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)	$G_{A\ t}$ (€ ha ⁻¹ año ⁻¹)	GI_A (€ ha ⁻¹ año ⁻¹)	GI_p (m ³ /ha/año)	$G_{A\ mc}$ (€ ha ⁻¹ año ⁻¹)	$G_{A\ ef}$ (€ ha ⁻¹ año ⁻¹) ²	$G_{A\ sg}$ (€ ha ⁻¹ año ⁻¹)	$\sum G_A$ (€ ha ⁻¹ año ⁻¹)	B (€ ha ⁻¹ año ⁻¹)
0	-	-	-	-	3 647	2 503	-	-	-	6 151	-6 151
1	0,138	0,197	3 584	494	0	0	110	82	20	707	2 819
2	0,138	0,197	3 584	494	0	0	110	82	20	707	2 819
...
8	0,138	0,285	3 584	494	315	0	110	82	20	1 022	2 504
9	0,138	0,280	3 584	494	298	0	110	82	20	1 004	2 521
...
25	0,138	0,202	3 584	494	18	0	110	82	20	724	2 802

Productividad del agua en parcela: 0,40 € m⁻³
Productividad del agua en cabecera: 0,38 € m⁻³
VPN = 36 113 € ha⁻¹

¹⁾ Tasa T_A calculada para que la Administración no tenga pérdidas con respecto a la situación inicial y, además, pueda recuperar el 100% de su parte de la inversión. Sumando a T_A las cantidades atribuibles a los gastos de administración, funcionamiento y conservación, se obtiene el coste agregado del agua para el regante, C_A .

²⁾ El coste de explotación o funcionamiento se estima adoptando un coste unitario del agua de 0,023 € m³.

Fuente: Elaboración propia, a partir de Junta de Andalucía (2002), EPDAP (2005), Rodríguez Ferrero *et al* (2008), MARM (2010) y Daimiel (2010).

Leyenda de las tablas 10 y 11: Variables para el cálculo del valor presente neto (VPN) y la productividad del agua

T_A : tasa, que, en la situación inicial, se corresponde con el valor medio del canon de regulación para los diferentes usos; y, en situación con proyecto, se calcula de modo que la Administración no tenga pérdidas con respecto a la situación inicial y, además, le permita recuperar el 100% de su parte de la inversión

C_A : coste final del agua; $C_A = \sum G_A / D_{Ab}$

D_{Ab} : Demanda o consumo de agua en parcela; en la situación final, D_{Ab} se obtiene corrigiendo esa demanda o las necesidades teóricas, según los casos, con los correspondientes coeficientes de eficiencia de aplicación

I : Ingresos o producción bruta

G_{NA} : Gastos de explotación no atribuibles al agua

G_{At} : Gastos derivados de la aplicación de T_A ; $G_{At} = T_A \cdot D_{Ab}$

G_{Amc} : Gastos de mantenimiento y conservación de las infraestructuras hidráulicas (reposiciones, reparaciones y limpiezas), estimados en un 1,2% de las inversiones

G_{Asg} : Gastos de administración del organismo gestor (servicios generales)

GI_A : Gastos de inversión en la modernización de la red de distribución y reparto, incluyendo amortizaciones

GI_p : Gastos de inversión en el sistema de aplicación en parcela, incluyendo amortizaciones

G_{Aef} : Gastos de explotación o funcionamiento, incluyendo la energía

$\sum G_A$: Suma de todos los anteriores gastos atribuibles al agua

B : Beneficio de explotación, sin actualizar; $B = I - (G_{NA} + \sum G_A)$

6.1.4. Resultados

El proyecto de modernización utilizado en este estudio de caso ofrece muy distintos resultados, según sean implementados unos u otros escenarios de acompañamiento. En la tabla 12 se exponen los principales resultados obtenidos. Los porcentajes representan las variaciones calculadas con respecto a los valores iniciales, sin modernización. Puede verse cómo, únicamente en el supuesto de reordenar los cultivos originales, se consigue aumentar, y de manera notable, el beneficio privado; y que, en caso contrario, no resultaría rentable la modernización que aquí se estudia. Y ello, aún cuando el regante haya de afrontar un gasto bastante mayor por el uso del agua. Lo mismo puede decirse con respecto a la productividad del agua, la cual prácticamente se duplica con el reajuste de superficies. Los mayores ahorros de agua se obtendrían cambiando el sistema de aplicación en parcela, de riego por gravedad a riego localizado, y, a diferencia de lo que pueda ocurrir en otras zonas, manteniendo las dosis de riego originales, ya que son ligeramente deficitarias con

respecto a las necesidades teóricas¹⁴. Consecuentemente, las mejores relaciones coste-eficacia se dan en esos mismos casos (1C y 2C).

El *escenario 2C*, por el que se cambia la distribución de cultivos, se mantienen los consumos iniciales de agua -ligemente por debajo de las necesidades teóricas- y el regante cambia de sistema de aplicación a riego localizado, ha resultado ser la opción más favorable, atendiendo al interés general. Y ello, porque repercute la mayor productividad del agua y la menor relación coste-eficacia. No obstante, arroja un beneficio privado inferior al de los otros escenarios en los que hay reordenación de cultivos, si bien la diferencia no sería muy significativa. Podría decirse entonces que con el *escenario 2C* el proyecto de modernización alcanzaría un mayor éxito colectivo. Generaría una elevada renta privada a lo largo de su vida útil, 36.113 €ha⁻¹, lo que supone un incremento de un 70% con respecto a la situación inicial sin proyecto. La tasa interna de rendimiento del proyecto sería de un 45,5%. Y esto incluso cuando el pago por los servicios del agua, a repercutir con la correspondiente tarifa, se encarecería considerablemente con respecto a la situación inicial: de entre 0,197 y 0,285 € m³, en vez de 0,039 € m³.

La productividad en parcela tomaría bajo este *escenario 2C* un valor de 0,40 € m³, mientras que en cabecera alcanzaría los 0,38 € m³. Es decir, que con el proyecto de modernización analizado, se conseguiría un aumento del valor productivo del agua de un 144% con respecto a la situación de partida. Y ello, aún habiendo considerado un origen enteramente superficial. Cabe suponer que, de haber y mantenerse una cierta demanda de origen subterráneo, estos valores se verían incrementados (por unas pérdidas menores de agua). Teniendo en cuenta que la alternativa media de cultivos que se propone en el proyecto está compuesta en un 70% por naranjos, puede verse que esos resultados son bastante similares a los que obtienen Berbel *et al* (2007b) para el cultivo de cítricos en el valle del Guadalquivir y el mismo año de referencia (0,34 € m³).

¹⁴ En esta zona, en términos medios, el agua que reciben los cultivos representa un 90% de sus necesidades brutas o teóricas. Este porcentaje resulta de dividir entre éstas el consumo medio en parcela, minorado con la eficiencia de aplicación del riego.

El ahorro de agua en cabecera que teóricamente se conseguiría con este proyecto, con la reordenación de cultivos y con la sustitución del sistema de riego en parcela (*escenario 2C*) resulta ser de $1.649 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ al año, es decir, de un 30% con respecto al volumen suministrado inicialmente. En el caso de que se ajustara el consumo a las necesidades teóricas (*escenario 2D*), se ahorraría un 23% ($1.246 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). La relación coste–eficacia atribuible al proyecto resulta de dividir el coste anual equivalente entre ese agua que, por año, se prevé ahorrar en cabecera: 0,56 y 0,75 € m^3 para 2C y 2D, respectivamente; cifras relativamente cercanas a las que ofrecen otras estimaciones, como las de Berbel y Gutiérrez (2004) o Camacho (2005), que se sitúan en torno a 0,45 € m^3 ; o la dada en CHG (2010), de 0,85 € por m^3 , para la modernización completa de riegos en el tramo medio del Guadalquivir y el Bajo Genil.

Como una mera aproximación al beneficio ambiental de aumentar el agua disponible, se ha adoptado la sugerencia recogida en MARM (2010): suponer que los “nuevos” recursos se imputarían a usuarios sujetos pasivos del canon, que no tienen garantía plena de suministro en el sistema de regulación. Así pues, el valor que adquiriría el agua que deja de ser utilizada, que estaría disponible para otros usos, se obtiene de considerar el valor medio del canon de los diferentes usos en dicho sistema de regulación general ($0,025 \text{ € m}^3$)¹⁵. En definitiva, el beneficio ambiental que con esta estimación repercutiría el escenario socialmente más favorable, el 2C, ascendería a unos $41 \text{ € ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

¹⁵ Nótese que este valor es muy inferior al valor productivo del agua utilizada para riego en la cuenca del Guadalquivir, que, en la situación inicial y de acuerdo con los estudios disponibles, se situaba en $0,29 \text{ € m}^3$ de media, mientras que en la situación con proyecto puede alcanzar, como se ha expresado, los $0,38 \text{ € m}^3$.

Tabla 12. Resumen de resultados y variación porcentual de valores con respecto a la situación inicial, previstos como consecuencia de la modernización de la zona regable del Genil, M.I., bajo los diferentes escenarios considerados. U.M.: euros de 2005

Escenarios	Reordenación de cultivos	Ajuste de riegos	Cambio de sistema de riego	Tarifa del agua (T _A)	Renta privada (VPN)		Productividad del agua en cabecera		Ahorro de agua en cabecera		Relación coste – eficacia ²	Beneficio ambiental ³
				€ m ⁻³	€ ha ⁻¹	Var. (%)	€ m ⁻³	Var. (%)	m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹	% ¹	€ m ⁻³	€ ha ⁻¹ año ⁻¹
0	-	-	-	0,025	21 240	-	0,157	-	-	-	-	-
1 A	-	-	-	0,107	7 695	-63,77	0,063	-59,51	571	10,53	1,44	14,27
1 B	-	√	-	0,097	7 798	-63,29	0,058	-62,93	53	0,97	15,75	1,32
1 C	-	-	√	0,132	5 034	-76,30	0,051	-67,37	1 484	27,37	0,63	37,09
1 D	-	√	√	0,119	5 167	-75,67	0,047	-69,74	1 063	19,61	0,88	26,58
2 A	√	-	-	0,112	38 787	82,61	0,334	113,02	774	14,28	1,05	19,35
2 B	√	√	-	0,101	39 674	86,79	0,308	96,88	278	5,12	2,97	6,94
2 C	√	-	√	0,138	36 113	70,03	0,383	144,33	1 649	30,41	0,56	41,22
2 D	√	√	√	0,125	37 029	74,34	0,355	126,36	1 246	22,98	0,75	31,15

¹⁾ Ahorro de agua calculado como porcentaje del consumo inicial en cabecera de la zona regable, o del volumen que es aportado a la red de transporte, en situación sin proyecto (*escenario 0*).

²⁾ El índice coste–eficacia del proyecto resulta de dividir su coste anual equivalente y la mejora a conseguir, en este caso, el agua que se prevé ahorrar por año en cabecera. El primero se ha calculado sumando a la inversión total, los costes de mantenimiento de las nuevas instalaciones, así como el incremento de los costes de explotación, todos ellos anualizados de acuerdo con la vida útil del proyecto a una tasa de descuento del 4%.

³⁾ Estimación por ahorro de agua, que resulta de considerar el valor medio del canon de los diferentes usos en el sistema de regulación general (0,025 € m³).

6.1.5. Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolla un análisis económico que ayuda a valorar la eficiencia de un proyecto de modernización de regadíos y a matizar su viabilidad. Dicho análisis ha sido aplicado a un estudio de caso. Sus resultados deben ser tomados con cautela, debido a que ciertos datos empleados son valores medios y a que otros son previsiones, si bien estos últimos son pocos y están fundamentados en una primera fase de modernización. No obstante, el análisis económico permite ver que la modernización estudiada puede contribuir a reducir el consumo de agua, y además incrementar los beneficios de explotación, mejorando en definitiva la eficiencia productiva en el uso de este recurso.

Estos logros pueden ser atribuidos a cuatro cuestiones clave: *i)* la mayor eficiencia en el transporte de agua que se consigue con la modernización; *ii)* un cambio en la orientación productiva hacia alternativas más rentables; *iii)* el ajuste de dotaciones a unos volúmenes adecuados, evitando riegos en exceso; *iv)* el mejor aprovechamiento del agua con los sistemas de riego localizado que con los antiguos riegos por gravedad. A su vez, la modernización presenta otras ventajas, que aquí no han sido analizadas. Así, la gestión conjunta de las zonas regables y los sistemas de telecontrol ayudan a administrar eficazmente los volúmenes de agua disponibles. Además, una mayor disponibilidad de agua superficial proporciona una mayor seguridad de suministro, disminuyendo el riesgo y estimulando con ello las inversiones futuras y la competitividad del sector.

El estudio ha revelado que la modernización de regadíos puede no resultar rentable, si no va acompañada de una reorientación productiva, adaptada a las condiciones del mercado, convirtiéndose éste en el factor de más trascendencia de los que aquí han sido tratados. Por otra parte, satisfacer las necesidades de agua en zonas en las que se riega deficitariamente y en las que la eficiencia de aplicación en parcela es baja, podría suponer un incremento en la demanda de agua, si únicamente se modernizaran las redes de distribución y no se sustituyeran los sistemas de aplicación por otros más eficientes. De hacer esto último, las cifras de ahorro de agua y las relaciones coste-eficacia serían las más desfavorables.

En definitiva, puede concluirse que las obras de modernización en alta no son suficientes por sí solas para alcanzar ahorros sustanciales de agua y altas productividades, si no van acompañadas de la adopción de sistemas eficientes de riego en parcela y de la adaptación

continúa de las producciones al mercado. Y que es importante considerar las necesidades de los cultivos y estudiar si los riegos deficitarios tienen o no mucha repercusión sobre la renta privada, en tanto que con ellos puede lograrse un considerable ahorro de agua, en algunos casos, sin menoscabo de la productividad. Es por ello que el asesoramiento a los regantes es una medida que debe acompañar a los proyectos de modernización.

6.2. EFICIENCIA Y RENTABILIDAD DE LA MODERNIZACIÓN EN ESPAÑA: REVISIÓN Y ANÁLISIS PARA LA TOMA DE DECISIONES

Artículo “Eficiencia y rentabilidad de la modernización de regadíos en España: revisión y análisis para la toma de decisiones”. Presentado en el *XXXII Congreso Nacional de Riegos, Asociación Española de Riegos y Drenajes (AERYD)*. Madrid 10-12 Junio 2014.

Autores: Javier Alarcón y Luis Juana.

6.2.1. Introducción

Desde hace más de una década, en España las Administraciones Públicas han adoptado una serie de estrategias para paliar la escasez de agua. Una de las más destacadas es la modernización de regadíos, impulsada por el Plan Nacional de Regadíos (PNR) (MAGRAMA, 2012) y el Plan de Choque de Modernización de Regadíos (BOE, 2006). La modernización agrupa a ciertas actuaciones dirigidas a mejorar las redes de transporte de zonas regables poco eficientes en el uso del agua. Contemplan la reparación de elementos dañados y la sustitución de los obsoletos, así como la racionalización del trazado de las redes y el cambio de los sistemas de aplicación. La modernización se justificó para ahorrar agua, si bien se tenía conciencia de otros beneficios asociados. Así, se esperaba incrementar la productividad y la competitividad de los regadíos (Plusquellec, 2009).

Durante la pasada década, los programas de modernización han mejorado 2 Mha de regadío, habiéndose invertido en torno a 7400 M€ (MAGRAMA, 2012). Sin embargo, los elevados costes de inversión y de energía que exigen los riegos a presión han sido un importante lastre para algunas explotaciones con escaso margen, todavía con una representatividad importante en España. No es extraño entonces que buena parte de estas inversiones hayan sido subsidiadas en España y en países como Austria, Portugal, Países Bajos, Australia o México (OCDE, 2008). Seguramente, la presión existente por el recurso agua, junto con una inadecuada valoración de ahorros y costes, haya motivado que se hayan realizado modernizaciones que han resultado caras para la Administración o para los propios agricultores (Hardy *et al*, 2012).

Son pocas las evidencias y pocos los estudios que vinculan la eficiencia en el uso del agua con su ahorro real (Ward y Pulido-Velázquez, 2008). Entre éstos pueden citarse a Huffaker y Whittlesey (2003), Peterson y Ding (2005), Schierling *et al* (2006) o Hussain *et al* (2007). De hecho, el pretendido ahorro de agua queda en entredicho cuando, al ser mejor aprovechada y aumentar su disponibilidad, se incrementan las dotaciones, se intensifican ciertos cultivos o incluso se amplían las zonas de riego, dejando menos superficie sin cultivar durante el verano. Como consecuencia, se incrementa el consumo. Y, mientras que la productividad por volumen servido en origen aumenta, la productividad por volumen consumido puede mantenerse o disminuir. Esto hace que los retornos del regadío disminuyan (Playán y Mateos, 2006; Perry *et al*, 2009; Lecina *et al*, 2010a; Lecina *et al*, 2010b; Rodríguez Díaz *et al*, 2012; o Pfeiffer y Lin, 2012). De este modo, no se puede decir que la modernización conlleve siempre un verdadero ahorro de agua, dándose la denominada “paradoja hidrológica” (Jensen, 2007; Ahmad *et al*, 2007; Ward y Pulido-Velázquez, 2008; o Rodríguez Díaz *et al*, 2012), así como la paradoja de Jevons (Alcott, 2005 y 2008; Tirado *et al*, 2006; Dumont *et al*, 2013).

En este trabajo estudiamos los costes y los beneficios de la modernización de regadíos y realizamos unos análisis simplificados, sin ánimo de exhaustividad aunque buscando una validez lo más amplia posible, que pueden ser útiles a la hora de tomar decisiones de inversión. Aunque el método es general, lo aplicamos a la transformación de riegos por gravedad en riegos localizados, muy frecuente en España en los últimos años. Un análisis detallado requeriría una información específica también detallada, en la que se tendrían que diferenciar muchos casos, lo que no parece adecuado para el presente trabajo. Por ejemplo, una misma opción técnica puede suponer costes y rendimientos de riego muy diversos, en función de sus características específicas. Por otra parte, existe dificultad en valorar económicamente algunos beneficios, como puede ser tener un riego por goteo frente a tener un riego por superficie. Por ello, más que llegar a la conclusión de que una solución es preferible a otra, lo que se pretende es ver qué nuevos rendimientos o qué nuevos márgenes justificarían una transformación a costa de la otra; y, como consecuencia, si hay expectativas de que, en un caso concreto, pueda concluirse que esa nueva opción es o no interesante.

6.2.2. Costes y eficiencia de la modernización

6.2.2.1. Costes de la modernización de regadíos

Todas las cifras de costes que se relacionan en este trabajo se dan en euros del año 2009. Han sido referidas a la unidad de superficie regable, si bien existen elementos de diseño que, teniendo gran repercusión en los costes, tienen una relación con la superficie que dista mucho de la de proporcionalidad (los materiales empleados, la altura de elevación, el grado de automatización, etc.). Los *costes de inversión* se refieren a costes de ejecución por contrata sin IVA, o bien, costes de ejecución material incrementados en un 22%, por gastos generales y beneficio industrial.

La inversión en redes de riego (distribución y reparto, en alta) ha sido obtenida de CEDEX (2013), en donde se analizan hasta 64 proyectos de obra, si bien sólo 35 se corresponden con las obras aquí estudiadas. Son por tanto costes presupuestados. La mayoría de estos proyectos incluye entubación de redes, construcción de balsas y estaciones de bombeo y filtrado, instalación de sistemas de automatización o telecontrol y electrificación. Sus promotores fueron las cuatro sociedades estatales de infraestructuras agrarias, las confederaciones hidrográficas y las sociedades estatales de aguas. Por zonas geográficas, un 50% de los proyectos se localiza en el cuadrante nordeste y cuenca del Ebro; un 19% en la zona norte y cuenca del Duero; un 15,5% en las regiones mediterráneas de Valencia y Murcia; un 12,5% en la zona centro o cuenca del Tajo; y el 3% restante en la cuenca del Guadalquivir.

La inversión en parcela (baja) ha sido acotada a partir de varias referencias, principalmente López-Cortijo (2008), CHG (2010) y Camacho (2012). La inversión en adecuación de riegos por gravedad, a falta de proyectos específicos, ha sido tomada de Playán *et al* (2000) y Díaz Barcos (2001). Los *costes anuales* agrupan, por un lado, los costes de funcionamiento, operación o explotación, y por otro, los costes de conservación y mantenimiento, entre los que se incluyen los de reparación, reposición y limpieza. Estos costes han sido estimados tras consultar, principalmente, las siguientes referencias: Montero y Tarjuelo (2004), Corominas (2010), CHG (2010), Rodríguez Díaz *et al* (2011) y Camacho (2012).

En la tabla 13 se muestran los valores medios obtenidos, promediada la inversión por la superficie de riego. Las cifras entre paréntesis se refieren a los valores mínimos y máximos, reflejando, como puede observarse, una amplia variación. En la figura 28 se representa la función de distribución de costes de inversión de la transformación a riego localizado.

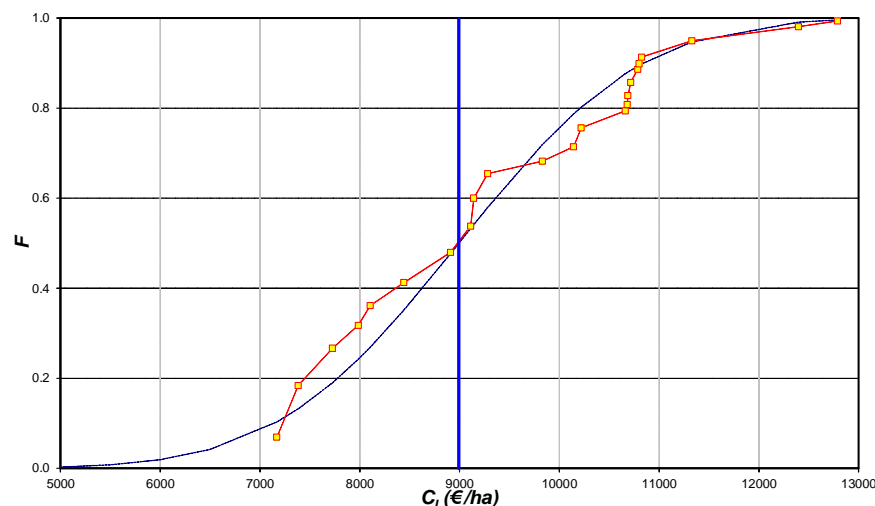
Tabla 13. Costes medios y rangos para la modernización de regadíos en España

Tipo de modernización	Inversión (€ ha ⁻¹)	Coste anual ¹ (€ ha ⁻¹)
Sustitución de riego por gravedad por riego localizado: Modernización de redes de distribución y reparto Cambio de sistema de aplicación en parcela: goteo	8 993 (5 922 – 14 035) 6 039 (4 214 – 9 835) 2 954 (1 708 – 4 200)	286 (202 – 370)
Sustitución de riego por gravedad por riego por aspersión: Modernización de redes de distribución y reparto Cambio de sistema de aplicación en parcela: aspersores Cambio de sistema de aplicación en parcela: pivots	7 916 (5 028 – 13 507) 6 039 (4 214 – 9 835) 3 210 (2 500 – 3 920) 1 542 (800 – 2 285)	298 (204 – 393)
Adecuación de riegos por gravedad	4 637 (3 591 – 6 815) ²	109 (83 – 135)

¹) Coste anual de funcionamiento, conservación y mantenimiento.

²) Incluye concentración parcelaria, nivelación mediante subsolado, embaste y capaceo, construcción de acequias, caminos y desagües perimetrales.

Figura 28. Función de distribución de la inversión en transformación de riego por gravedad en riego localizado. La línea de trazos representa su ajuste a una distribución normal



6.2.2.2. Eficiencia en el uso del agua

La eficiencia o el rendimiento en el uso del agua se estima como la fracción de agua útil que cumple los objetivos previstos, con frecuencia, satisfacer la transpiración de la planta. Es pues un valor complementario a las pérdidas. En los regadíos puede distinguirse entre la

eficiencia de conducción y distribución, como relación entre el volumen entregado a las parcelas y el que es realmente dispuesto en cabecera de la red de riego; y la eficiencia de aplicación, como relación entre el agua útil y la suministrada a la parcela.

En los proyectos de modernización es raro que se faciliten previsiones de ahorro de agua. Una estimación extendida e imprecisa es que se viene a conseguir un ahorro del 20-30%. La tabla 14 refleja rangos de eficiencia para los tres métodos de riego, obtenidos por revisión bibliográfica. Las fuentes han sido, fundamentalmente: Krinner *et al* (1994), Hanson (1995), Rogers *et al* (1997), SWSI (2004) y ESTEPA (2010). Estas cifras responden a sistemas en buen estado, buenos diseños y un adecuado manejo del riego, de modo que, si no es el caso, pueden ser claramente inferiores. Por ello, no deben tomarse como valores específicos. No obstante, aquí las emplearemos como valores de referencia, aún siendo conscientes, tal y como se desprende de la bibliografía, que hay grandes diferencias en los valores en parcela.

Tabla 14. Rangos frecuentes de rendimientos en redes de distribución y reparto (R_r) y redes de aplicación (R_a), por sistema de riego. Rendimientos medios globales (R) y sus desviaciones

Sistema de riego	R_r	R_a	$R = R_r \cdot R_a$		
			m	s	CV
Gravedad	0,65 - 0,95	0,50 - 0,80	0,54	0,20	0,37
Aspersión	0,75 - 0,95	0,70 - 0,90	0,70	0,15	0,22
Localizado	0,75 - 0,95	0,90 - 0,95	0,79	0,10	0,13

m: media; s: desviación típica; CV: coeficiente de variación ($CV = s/m$)

Los indicadores de desempeño y el llamado “benchmarking” han sido utilizados para evaluar la eficiencia de los regadíos (Alexander y Potter, 2004; Lecina *et al*, 2010b; Mateos *et al*, 2010). Tienen un gran potencial para averiguar si una actuación permite alcanzar unos ciertos objetivos. Así, la productividad del agua se ha utilizado para comparar zonas regables (Allan, 1999; Rodríguez Ferrero *et al*, 2010; o Rodríguez Díaz, 2008 y 2012). Y el coste del agua ahorrada, para estudiar la eficacia de ciertas medidas (Zanou *et al*, 2003; Turner *et al*, 2004; Semaan *et al*, 2007; o Blanco-Gutiérrez *et al*, 2011). En este trabajo se analizan cuatro indicadores que consideramos útiles para caracterizar la modernización de regadíos: *i*) el ahorro de agua relativo a la inversión y al consumo de energía; *ii*) el beneficio que compensa dicha inversión, ya sea por aumento de los márgenes de explotación o por el uso que se haga del agua ahorrada; *iii*) el coste que supone cada metro cúbico que es ahorrado; y *iv*) la productividad del agua.

6.2.3. Métodos

La modernización de un regadío implica un cambio en el uso del agua, la energía y el capital. Así mismo, aunque se mantenga la orientación productiva, las nuevas instalaciones permiten y/o aconsejan cambios en el proceso productivo. Como consecuencia, las nuevas explotaciones ven modificados sus márgenes de beneficio en cantidades que pueden justificar o no la actuación. Dado que algunos parámetros de referencia son inciertos y cambiantes, es útil establecer unas relaciones y unos intervalos que permitan discriminar aquellos valores para los que se cambia de signo, para los cuales la modernización pasa de estar justificada a no estarlo. Ello nos permitirá ubicarnos y, si cabe, nos ayudará en la toma de decisiones.

Comparando dos situaciones, antes y después de la modernización, cabe esperar que tengan signo positivo, pues de otro modo el cambio seguramente no interesaría, la variación en la eficiencia en el uso de agua o rendimiento, $R_2 - R_1$, así como la variación del beneficio de explotación, B_u (€ ha⁻¹ año⁻¹). Pero también se verán incrementados la inversión, C_{Iu} (€ ha⁻¹), los costes anuales de conservación y mantenimiento de infraestructuras e instalaciones y los gastos de administración imputables, C_{Cu} (€ ha⁻¹ año⁻¹), la potencia energética instalada, P_u (kW ha⁻¹), el consumo de energía, E_u (kWh m⁻³), y el coste del agua, C_{au} (€ ha⁻¹ año⁻¹), siempre y cuando en este último se introduzcan tarifas que permitan recuperar los costes asociados a la inversión. Para evitar duplicidades y lograr una mayor simplicidad, incluiremos el coste del agua en C_{Iu} y en C_{Cu} . El signo de la variación en las necesidades de agua, ET (m³ ha⁻¹ año⁻¹), dependerá de los casos, y con ello el ahorro unitario de agua, A_u (m³ ha⁻¹ año⁻¹), si bien es razonable prever signo positivo para este último parámetro.

$$\begin{aligned}
 B_u &= B_2 - B_1 & A_u &= \frac{ET_1}{R_1} - \frac{ET_2}{R_2} & C_{Iu} &= C_{I2} - C_{I1} & C_{Cu} &= C_{C2} - C_{C1} \\
 P_u &= P_2 - P_1 & E_u &= \frac{ET_2}{R_2} \cdot E_{v2} - \frac{ET_1}{R_1} \cdot E_{v1} & & & & (57)
 \end{aligned}$$

Para saber si una situación final 2 es preferible a otra inicial 1, habrá que ver que el aumento de beneficio que se logra compensa el aumento de costes. El ahorro de agua puede ser valorado, atribuyéndole el beneficio marginal que puede obtenerse para un cierto

uso, BM (€ m³); o, si se prefiere, el coste marginal, CM (€ m³), de producirlo de forma alternativa. En consecuencia, la medida estará justificada si se cumple:

$$A_u \cdot BM + B_u - C_{lu} \cdot a - C_{Cu} - P_u \cdot C_{Pu} - E_u \cdot C_{Eu} \geq 0 \quad (58)$$

en donde a (años⁻¹) es el factor que permite anualizar la inversión, C_{Pu} (€ kW¹ año⁻¹) es el término fijo por contratación de potencia eléctrica (los costes de inversión de la instalación de bombeo se incluyen en C_l) y C_{Eu} (€ kWh¹) es el precio de la energía. Para simplificar, en la expresión (59), al beneficio de explotación se le han descontado los costes de conservación y mantenimiento y los de la potencia eléctrica, costes que podemos suponer fijos: $B' = B - C_C - P \cdot C_{Pu}$. A este término le podemos seguir llamando ‘beneficio de explotación’, pero, para no confundir, se le diferenciará añadiéndole el apóstrofe (').

$$A_u \cdot BM + B'_u - C_{lu} \cdot a - E_u \cdot C_{Eu} \geq 0 \quad (59)$$

6.2.3.1. Ahorro unitario de agua

Haciendo uso de B'_u y de las expresiones previas en (57) para A_u y E_u , se obtiene:

$$\frac{ET_1}{ET_2} \cdot \frac{R_2}{R_1} - 1 \geq \frac{C_{lu} \cdot a - B'_u}{BM} \cdot \frac{R_2}{ET_2} + \left(1 - \frac{ET_1}{ET_2} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{E_{v1}}{E_{v2}} \right) \cdot \frac{E_{v2} \cdot C_{Eu}}{BM} \quad (60)$$

El punto de igualación, conocidas todas las variables menos una, nos permite determinar los valores de la variable desconocida, a partir de la cual empezaría a interesar el cambio. Puede ser útil para ello establecer parámetros, aunque engloben a varias variables, y hacer que algunas variables adopten valores fijos de referencia, o bien que puedan despreciarse. Así, supondremos una transformación de riego por superficie a riego a presión, en la que la situación inicial no requiere energía ($E_{v1} = 0$), y en la que las necesidades netas de agua coinciden ($ET_1 = ET_2 = ET$), no así las necesidades brutas, por tener los dos sistemas distintos rendimientos ($R_1 \neq R_2$). La expresión (60) podría entonces escribirse:

$$\frac{R_2}{R_1} - 1 \geq \frac{C_{lu} \cdot a - B'_u}{BM} \cdot \frac{R_2}{ET} + \frac{E_{v2} \cdot C_{Eu}}{BM} \quad (61)$$

El primer miembro de (61) hace referencia al *ahorro unitario de agua con referencia a la situación final*. Obsérvese que puede tomar valores mayores de la unidad, cosa que no ocurriría de haber tomado como referencia la situación inicial, lo cual no se ha hecho para evitar expresiones más complejas. El primer sumando del segundo miembro representa la

variación de costes y beneficios, fundamentalmente debido a las inversiones y a los márgenes de explotación; y el segundo sumando, la *variación en el gasto de energía*, ambos en relación con el beneficio marginal del agua ahorrada. Puede observarse que si $B'_u = C_{lu} \cdot a$, el cambio estará justificado siempre y cuando el ahorro de agua sea mayor que el gasto de energía. Y que, cuando no implica consumo energético ($E_{v2} = 0$), se justificaría si el ahorro de agua fuese mayor que la variación equivalente de costes y beneficios.

6.2.3.2. Beneficio y coste marginal del agua ahorrada

Si el beneficio de explotación no cambiase, $B_u = 0$, la modernización únicamente cabría ser justificada por el posible ahorro de agua, A_u ; en el sentido de que, si el beneficio marginal que puede lograrse con esa agua ahorrada, BM , es superior a su coste marginal, podremos pensar que la inversión interesaría. Entonces, para el caso contemplado en que $ET_1 = ET_2 = ET$, despejando BM en la expresión (59), y escribiendo A_u según (58), tenemos

$$BM = (C_{lu} \cdot a + C_{cu} + P_u \cdot C_{pu} + E_u \cdot C_{eu}) \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{ET(R_2 - R_1)} \equiv CM \quad (62)$$

Por otro lado, el coste marginal del agua ahorrada, CM , se define como la relación entre el coste total de la medida y el agua que ésta ahorra, A_u . Analíticamente, dicha relación es la misma que la (62), por lo que es también válida para este indicador. CM puede compararse con los costes de obtener nuevos recursos, en vez de ahorrarlos.

6.2.3.3. Productividad del agua

Conviene diferenciar el beneficio marginal que puede conseguirse del agua ahorrada, BM , del valor productivo del agua que se espera alcanzar tras la modernización, P_{a2} . La productividad final resulta de restar al beneficio de explotación los costes de inversión, funcionamiento, conservación y mantenimiento, y dividir el resultado entre el volumen de agua suministrada a la red de riego. Teniendo en cuenta la simplificación hecha en (59):

$$P_{a2} = (B'_2 - C_I \cdot a - E_2 \cdot C_{E2}) \cdot \frac{R_2}{ET_2} \quad (63)$$

6.2.4. Aplicación a un estudio de caso con valores medios

Los métodos expuestos han sido aplicados a la transformación de riego por gravedad en riego localizado. Se han tomado unas necesidades anuales de agua $ET_2 = 4116 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, acordes con el dato de demanda media neta que para España proporciona el PNR (MAGRAMA, 2012). Buscando una cierta representatividad a nivel nacional en los resultados, se ha tomado la inversión media de la tabla 13, $C_{Iu} = 8993 \text{ € ha}^{-1}$, así como el rendimiento medio de la tabla 14, $R_2 = 0.79$. Los costes de conservación y mantenimiento se han estimado en un 1.2% de los de inversión, de conformidad con MMA (2000). Para los costes de energía, se han tomado los siguientes valores: $P_u = 1.5 \text{ kW} \cdot \text{h ha}^{-1}$ (Rodríguez Díaz *et al.*, 2012); $C_{Pu} = 44.28 \text{ € kW}^1 \text{ año}^{-1}$ (Ederra, 2010); $E_u = E_{v2} = 0.53 \text{ kW} \cdot \text{h m}^{-3}$ (Corominas, 2010), suponiendo $E_{v1} = 0$; $C_{Eu} = 0.074 \text{ € kWh}^1$ (Ederra, 2010). La tasa de descuento aplicada ha sido del 4% y la vida útil de 25 años ($a = 0.064 \text{ años}^{-1}$), como es habitual en la evaluación de este tipo de proyectos. No obstante, autores como Scherer y Weigel (1993) recomiendan 15–20 años para sistemas presurizados. Por eso, hemos observado además los resultados a los que se llegaría con 20 años. La relación entre las respectivas anualidades, $a_{20}/a_{25} = 1.15$, nos da una buena idea de la relación que ha de darse entre los diversos costes y beneficios que aquí se analizan.

Para poder completar el método, hace falta estimar una cierta variación en el margen de explotación. Para ello, se han tomado datos de la zona regable del Genil, M.I. (Córdoba), procedentes del informe de viabilidad de su proyecto de modernización (MARM, 2010), así como otros datos técnico-económicos de explotaciones agrícolas en Andalucía (Junta de Andalucía, 2002; MAGRAMA, 2010). El consumo medio de agua estimado en dicha zona se aproxima mucho a la ET elegida. Buscando específicamente el efecto económico de las obras de modernización, hemos considerado que los cultivos de la misma se mantienen en su misma superficie, antes y después de ser modernizada ($ET_1 = ET_2$), si bien es frecuente introducir cultivos de mayor rentabilidad o dedicar a éstos una mayor superficie (tal y como se preveía en MARM, 2010). Sin embargo, hemos estimado que las producciones de partida se incrementan, como consecuencia de un mejor aprovechamiento del agua por los cultivos: en un 15% para el maíz, un 19% para el algodón, un 20% para los naranjos y un 14% para los hortícolas al aire libre (MAGRAMA, 2010; MARM, 2010).

6.2.4.1. Beneficio vs. inversión: beneficios que compensarían la modernización

Considerando que no se consigue ahorrar agua ($R_2 = R_1$) o que no se obtiene beneficio del agua ahorrada ($BM = 0$), de la expresión (61) se obtiene el incremento de beneficio de explotación que se requeriría para compensar la inversión y los nuevos gastos energéticos:

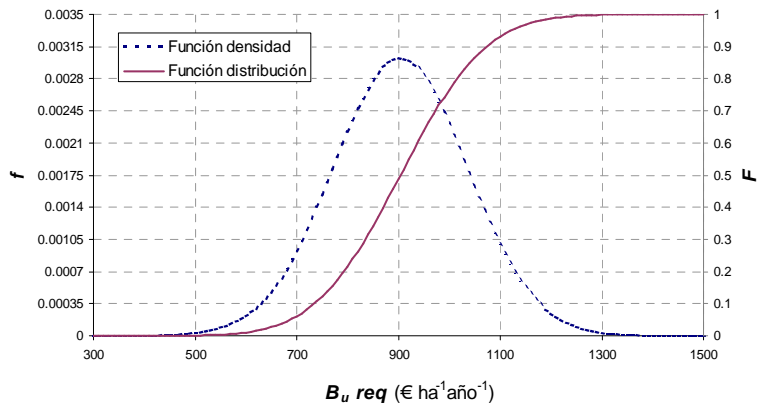
$$B'_u \geq C_{lu} \cdot a + \frac{ET}{R_2} \cdot E_{v2} \cdot C_{Eu} \quad (64)$$

Con los valores medios que han sido indicados, se obtiene $B'_u = 780 \text{ € ha}^{-1}$; y con $B'_u = B_u - C_{Cu} - P_u \cdot C_{Pu}$, resulta $B_u = 903 \text{ € ha}^{-1}$, a partir del cual se rentabilizaría la inversión (B_u requerido). Sin embargo, el incremento medio de beneficio estimado para los cultivos de la Z.R. del Genil M.I. asciende a $B_u = 411 \text{ € ha}^{-1}$ ($B'_u = 288 \text{ € ha}^{-1}$), insuficiente pues para justificar la modernización. Ni tan siquiera podría compensar la inversión en parcela, ya que esto exigiría un $B_u = 517 \text{ € ha}^{-1}$.

Con los valores medios y los coeficientes de variación de los datos expresados anteriormente (tablas 13 y 14), se ha estimado el valor medio y el coeficiente de variación de B_u . Para ello, se han aplicado relaciones clásicas aproximadas (Benjamin y Cornell, 1970) a la expresión (64) y a la que relaciona B_u con B'_u . De suponer además que B_u siguiera una distribución normal, puede obtenerse la función densidad (figura 29). Según ésta, la probabilidad de que, por ejemplo, el $B_u = 411 \text{ € ha}^{-1}$ compense los costes sería de sólo el 0.01%. Y serían necesarios más de $1300 \text{ € ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ para que estuviera garantizada la inversión. Los valores podrían ser más bajos, de considerar el beneficio del agua ahorrada.

Figura 29. Funciones de densidad, f , y distribución acumulada, F , del incremento de beneficio de explotación requerido, para la transformación de riego por gravedad en riego localizado

Datos	media	CV
$Clu \text{ (€ ha}^{-1}\text{)}$	8 993	0,16
a	0,064	-
$ET \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1}\text{año}^{-1}\text{)}$	4 116	0,15
R_2	0,79	0,20
$E_{v2} \cdot C_{Eu} \text{ (€ m}^{-3}\text{)}$	0,039	0,27
$P_u \cdot C_{Pu} \text{ (€ ha}^{-1}\text{año}^{-1}\text{)}$	66	0,47
$C_{Cu} \text{ (€ ha}^{-1}\text{año}^{-1}\text{)}$	57	0,72
$B_u \text{ estimado (€ ha}^{-1}\text{año}^{-1}\text{)}$	411	-
Resultados	media	CV
$B_u \text{ requerido (€ ha}^{-1}\text{año}^{-1}\text{)}$	903	0,15



6.2.4.2. Ahorro de agua que justifica la modernización

Empleando la expresión (61), puede estudiarse el incremento relativo de rendimiento o eficiencia global de riego, R_2/R_1-1 , el cual representa el ‘ahorro unitario de agua con referencia a la situación final’. Este indicador puede utilizarse, como vamos a ver, para justificar un aumento de energía o una cierta inversión.

Ahorro de agua vs. consumo de energía

Según (61), en un caso en que $C_{lu} \cdot a = B'_u$, supuesto 1 de la siguiente tabla 15, un cierto ahorro unitario de agua, R_2/R_1-1 , justificaría un aumento del consumo de energía dado por:

$$E_{v2} = (R_2/R_1-1) \cdot BM/C_{Eu}, \quad (65)$$

en donde BM es el beneficio marginal que del agua se puede esperar en la situación final. E_{v2} vendrá expresado en kWh m^{-3} , o bien como la altura de elevación $H(\text{m})$, suponiendo un determinado rendimiento de la estación de bombeo, η .

En la tabla 15 se ha considerado un $BM = 0.29 \text{ € m}^3$ y un coste energético $C_{Eu} = 0.074 \text{ € kWh}^{-1}$. Con estos valores, para un consumo energético unitario $E_{v2} = 0.59 \text{ kW} \cdot \text{h m}^{-3}$ (equivalente, con un $\eta = 0.80$, a una elevación a 173 m), se obtendría la entrada general $R_2/R_1-1 = 0.15$. Así pues, para un rendimiento inicial de riego $R_1 = 0.60$, por debajo del cual quedaría el 57% de la superficie regada en España, la modernización estaría justificada si permitiese conseguir un rendimiento R_2 de al menos 0.69. Obsérvese que BM tiene una influencia determinante. Así, si BM se redujera en 4 veces, al mismo valor de E_v o H ahora le correspondería un valor de R_2/R_1-1 cuatro veces mayor, 0.60, que haría no rentable la transformación en términos generales y para la mayor parte de las explotaciones, pues debería alcanzarse un $R_2 = 0.96$. El mínimo BM , por debajo del cual no interesaría la transformación, puede ser también estimado.

Ahorro de agua vs. costes de inversión

En la tabla 15, el supuesto 2 responde al caso en el que la energía no se incrementase, $E_u = 0$, y la modernización permitiese alcanzar unos valores de referencia de $R_2 = 0.79$ y $B'_u = 288 \text{ € ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Despejando C_{Iu} en la expresión (61), obtenemos:

$$C_{Iu} = \frac{1}{a} \left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right) \cdot \frac{ET}{R_2} \cdot BM + B'_u \quad (66)$$

De este modo, un determinado ahorro de agua, R_2/R_1-1 , podría justificar una cierta inversión, C_{Iu} . Entrando en la tabla 15 con un coste de inversión, puede obtenerse el rendimiento de partida, R_1 , por debajo del cual interesaría el cambio. Así, a una inversión de 7369 € ha^{-1} , por debajo del cual estaría el 13% de la superficie regada en España, le correspondería una entrada general $R_2/R_1-1 = 0.30$; y, dado que $R_2 = 0.79$, la modernización estaría justificada si R_1 fuese menor de 0.60 (57% de esa superficie). Para R_1 superiores, esta inversión no interesaría.

Ahorro de agua vs. costes de inversión y de energía

Si hay inversión y a la vez variación en el consumo de energía, hemos de considerar los dos sumandos del segundo término de la ecuación (61), lo cual se corresponde con el supuesto 3 de la tabla 15. Para $C_{Iu} = 8993 \text{ € ha}^{-1}$ y las demás variables de referencia consideradas en este estudio de caso (ver tabla de la figura 29), la entrada general sería ahora $R_2/R_1-1 = 0.32$, por lo que, para un rendimiento final $R_2 = 0.79$, el de partida debería estar por debajo de 0.60.

Tabla 15. Rendimientos iniciales, R_1 , y finales, R_2 , y ahorro unitario de agua, $R_2/R_1 - 1$, para la transformación de riego por gravedad en riego localizado. Consumos de energía e inversiones relacionadas, bajo diferentes supuestos

Supuestos	$\frac{R_2}{R_1} - 1$		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,75	1,00
	F	R_1	R_2										
	0,22	0,30	0,32	0,33	0,35	0,36	0,38	0,39	0,42	0,45	0,48	0,53	0,60
	0,27	0,35	0,37	0,39	0,40	0,42	0,44	0,46	0,49	0,53	0,56	0,61	0,70
	0,32	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,56	0,60	0,64	0,70	0,80
	0,38	0,45	0,47	0,50	0,52	0,54	0,56	0,59	0,63	0,68	0,72	0,79	0,90
	0,45	0,50	0,53	0,55	0,58	0,60	0,63	0,65	0,70	0,75	0,80	0,88	1,00
	0,51	0,55	0,58	0,61	0,63	0,66	0,69	0,72	0,77	0,83	0,88	0,96	
	0,57	0,60	0,63	0,66	0,69	0,72	0,75	0,78	0,84	0,90	0,96		
	0,64	0,65	0,68	0,72	0,75	0,78	0,81	0,85	0,91	0,98			
	0,70	0,70	0,74	0,77	0,81	0,84	0,88	0,91	0,98				
	0,75	0,75	0,79	0,83	0,86	0,90	0,94	0,98					
	0,80	0,80	0,84	0,88	0,92	0,96	1,00						
	0,84	0,85	0,89	0,94	0,98								
	0,88	0,90	0,95	0,99									
1) $B'_u = a \cdot C_{lu}$, $E_u \neq 0$	$E_{v2} (kWh m^{-3})$		0,20	0,39	0,59	0,78	0,98	1,18	1,57	1,96	2,35	2,94	3,92
	$H (m)$		58	115	173	230	288	346	461	576	691	864	1 152
2) $E_u = 0$, $B'_u = 288$, $R_2 = 0,79$	$C_{lu} (€ ha^{-1})$		1 468	2 648	3 829	5 009	6 189	7 369	9 730	12 090	14 450	17 991	23 892
	F		0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,13	0,70	0,98	1,00	1,00	1,00
3) $E_u \neq 0$, $B'_u = 288$, $R_2 = 0,79$	$C_{lu} (€ ha^{-1})$		2 488	3 668	4 848	6 028	7 209	8 389	10 749	13 110	15 470	19 011	24 912
	F		0,00	0,00	0,00	0,02	0,11	0,34	0,89	1,00	1,00	1,00	1,00

B'_u : incremento de beneficios de explotación, descontando los costes de conservación y mantenimiento y el coste fijo de la energía, $B'_u = B_u - C_{Cu} - P_u \cdot C_{Pu}$

E_{v2} : consumo de energía por m^3 de agua en la situación modernizada, siendo en este caso $E_{v1} = 0$; $E_{v2} = (R_2/R_1 - 1) \cdot BM / C_{Eu}$, en donde $BM = 0.29 \text{ € m}^3$ y $C_{Eu} = 0.074 \text{ € kWh}^{-1}$

H : altura de bombeo correspondiente a E_{v2} y a un rendimiento de bombeo $\eta = 0.8$

C_{lu} : coste de inversión, despejando en la expresión (61), variando $R_2/R_1 - 1$ según la tabla, con $a = 0,064 \text{ años}^{-1}$, $B'_u = 288 \text{ € ha}^{-1}$, $BM = 0.29 \text{ € m}^3$, $R_2 = 0.79$, $ET = 4116 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, $E_{v2} \cdot C_{Eu} = 0.039 \text{ € m}^3$

F : probabilidad de ser superada la entrada correspondiente

6.2.4.3. Beneficio marginal del agua ahorrada

Mediante la expresión (62), se han calculado los beneficios marginales del agua ahorrada, BM , que permitirían compensar los costes medios barajados para la transformación de riego por gravedad en riego localizado. Estos BM se muestran en la tabla 16. Aquellos que no sobrepasen la productividad de referencia serán los que interesen. La productividad del agua de riego puede tomar valores muy diversos. La aplicación que se haga de este método deberá lógicamente adoptar el valor más adecuado al caso analizado. A falta de este dato, es factible recurrir a valores orientativos, como el valor medio para España que se da en MIMAM (2007): 0.29 € m^3 . Como valor de comparación por lo bajo, podríamos emplear la menor productividad que allí se estima: 0.11 € m^3 , en la Cuenca del Duero.

Así pues, en la tabla 16 se han resaltado en negrita aquellos BM que no sobrepasan la mencionada productividad media en España. Sus correspondientes combinaciones de ET , R_2/R_1-1 y R_1 serán las que justificarían la inversión, pues, con ellas, es posible obtener más beneficio que el estrictamente necesario para compensarla. En línea con todo lo anterior, las necesidades de agua iniciales se han mantenido: $ET_1 = ET_2$. Como puede apreciarse en la tabla 16, es difícil que la modernización sea económicamente rentable para valores de productividad inferiores a 0.11 € m^3 , los cuales pueden darse en ciertos regadíos.

Tabla 16. Beneficios y costes marginales del agua ahorrada, $BM \equiv CM$, para la transformación de riego por gravedad en riego localizado, con un rendimiento final, $R_2 = 0.79$, en función de las necesidades, ET , el ahorro unitario de agua, $R_2/R_1 - 1$, y el rendimiento inicial, R_1

ET (m ³ ha ⁻¹)		1 500	2 100	2 700	3 300	3 900	4 500	5 100	5 700	6 300	6 900	7 500
$\frac{R_2}{R_1} - 1$	R_1	BM \equiv CM (€ m ⁻³)										
1,63	0,30	0,28	0,20	0,16	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06
1,26	0,35	0,37	0,26	0,20	0,17	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07
0,98	0,40	0,47	0,34	0,26	0,22	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09
0,76	0,45	0,61	0,44	0,34	0,28	0,24	0,20	0,18	0,16	0,15	0,13	0,12
0,58	0,50	0,80	0,57	0,44	0,36	0,31	0,27	0,23	0,21	0,19	0,17	0,16
0,44	0,55	1,06	0,76	0,59	0,48	0,41	0,35	0,31	0,28	0,25	0,23	0,21
0,32	0,60	1,46	1,04	0,81	0,66	0,56	0,49	0,43	0,38	0,35	0,32	0,29
0,22	0,65	2,15	1,53	1,19	0,98	0,83	0,72	0,63	0,56	0,51	0,47	0,43
0,13	0,70	3,59	2,57	2,00	1,63	1,38	1,20	1,06	0,95	0,86	0,78	0,72
0,05	0,75	8,66	6,19	4,81	3,94	3,33	2,89	2,55	2,28	2,06	1,88	1,73

Nota: se considera que $R_2 = 0.79$, $ET_1 = ET_2 = ET$ y $a = 0,064 \text{ años}^{-1}$ (25 años).

6.2.4.4. Coste marginal del agua ahorrada

Cabe pensar que la modernización estaría justificada si el coste marginal del agua ahorrada, CM (expresión 62), fuese inferior al coste de obtener agua por otra vía. Como valor de comparación, hemos tomado un coste para el agua desalada de 0.50 € m^3 , el cual ha sido aproximado a partir de Torres (2004) y diversos informes de viabilidad de plantas desaladoras (ACUAMED, 2006a; ACUAMED, 2006b; ACUASEGURA, 2007). Al menos de momento, dicho coste resulta casi inaccesible para la mayor parte del regadío español, aunque en las Cuencas Mediterráneas de Andalucía, Canarias y la Cuenca del Segura, la productividad media del agua lo supera (MIMAM, 2007). El coste de suministrar otro

recurso alternativo, tal como el agua regenerada o la procedente de un trasvase, podría ser así mismo considerado.

En la tabla 15 puede verse que aproximadamente algo más de la mitad de los valores de CM no sobrepasan dicho coste de desalación. Sus correspondientes combinaciones de ET , R_2/R_1-1 y R_1 serán las que justificarían la inversión. Así, por comparación con ese valor, puede verse que en general, salvo para necesidades altas, el riego localizado no estaría justificado cuando el rendimiento inicial, R_1 , supera el 0.60. Para $ET = 4116 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y el resto de valores de referencia adoptados, estaría justificado para unos R_1 inferiores a 0.60.

6.2.4.5. Productividad del agua

Para la modernización de nuestro estudio de caso, de la expresión (63) resulta una productividad de 0.22 € m^{-3} . Suponiendo que el rendimiento de partida fuera $R_1 = 0.45$, para una misma $ET = 4116 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, resultarían 0.18 € m^{-3} . En ese caso, se mejoraría el valor productivo del agua. El haber considerado que se mantiene la distribución original de cultivos hace que el valor obtenido sea bajo, en comparación con los que se dan en zonas modernizadas en las que se han introducido cultivos de alta rentabilidad, como sucede con los cítricos. Así, como se verá en el siguiente epígrafe 6.2, para la misma zona del Genil M.I., pero considerando una reorientación en la que los naranjos ocupan un 70% de la superficie en lugar de sólo el 20%, resultan 0.40 € m^{-3} . Berbel *et al* (2007b) obtienen 0.34 € m^{-3} para los cítricos en el valle del Guadalquivir. Y, según Fernández García *et al* (2013), la modernización de cuatro zonas regables de Andalucía, junto con la sustitución de cultivos como el maíz y el algodón por cítricos, ha hecho aumentar la productividad de $0.40\text{-}0.70$ a $0.66\text{-}1.09 \text{ € m}^{-3}$.

6.2.5. Conclusiones

A partir de una amplia compilación de datos, se han estimado unos valores medios y unos rangos de variación para los costes de inversión y para los costes anuales de los sistemas de riego modernizados, así como para su eficiencia de uso del agua. Aunque la realidad es compleja y podría haber situaciones individuales que no estén representadas adecuadamente, a gran escala, los valores pueden considerarse de referencia para el estudio planteado y no difieren de los que se manejan en algunas referencias de la Administración.

El método empleado permite estimar el incremento del beneficio o margen de explotación que justificaría las inversiones. Con esos costes medios, se ha obtenido que probablemente en algunos regadíos españoles no estaba justificada la transformación en riego localizado, a no ser que se produzca una reorientación productiva que aumente el margen de las explotaciones de forma considerable. Cabe suponer entonces que las presentes y futuras modernizaciones quedarán supeditadas a la viabilidad de unos cultivos más rentables, como los cítricos.

Así mismo, se ha puesto de relieve que la modernización es cuestionable para ahorrar agua, a no ser que los rendimientos del método tradicional sean bajos o las necesidades de riego elevadas. Dicho de otro modo, el coste atribuible al agua ahorrada no parece que pueda ser compensado con el beneficio que de la misma podría obtenerse. Dicho coste podría ser incluso superior al de un recurso alternativo, como el agua desalada. Alternativas más económicas, como la adecuación de sistemas de riego por gravedad, podrían ser de interés. Seguramente, la medida más eficaz en estos momentos sea la evaluación y el adecuado mantenimiento de las instalaciones ya existentes, para que sigan funcionando tal y como fueron proyectadas.

El análisis que aquí se propone se debería completar con el estudio de los retornos y la posibilidad de reutilizar el agua no consumida, llevando a cabo una cierta contabilidad del agua. Así mismo, sería conveniente revisar los derechos de asignación, en función de las mejoras conseguidas en los rendimientos de riego, al objeto de reducir el consumo no productivo del agua. Otro aspecto a estudiar es la calidad de las aguas de retorno, en tanto que la modernización puede contribuir a mejorarla. Y también la posible destrucción de la vegetación hidrófila y los hábitats que los regadíos tradicionales suelen albergar. Porque, como se ha visto, determinadas actuaciones que se dirigen a incrementar la eficiencia de riego pueden suponer escasos ahorros de agua, a un coste elevado.

Todo lo anterior invita a elaborar un estudio más complejo y preciso, que tuviera en cuenta en lo posible esos aspectos y esas externalidades no abordadas. Aunque el agua sea un recurso especial, su valoración económica parece posible. Aún con sus dificultades, los resultados ayudarían en la toma de decisiones, tanto de acometer o no obras de modernización, como de gestionar los recursos hídricos. Para ello, el valor productivo del

agua, así como los costes de la desalación o de cualquier otra técnica que permita transformar un agua improductiva en productiva, se convierten en valores de referencia necesarios; y, en la medida que puedan precisarse mejor, las valoraciones serán de mayor utilidad.

TERCERA PARTE:

Discusión, Conclusiones y Extensiones

7. DISCUSIÓN

Para evaluar proyectos o políticas públicas se emplean diversas técnicas y metodologías, que dependen del objetivo de la evaluación, del proyecto o la política en cuestión, del momento en que se lleve a cabo la misma (antes o después de la toma de decisiones), e incluso del sector económico sobre el que se aplican (Planas, 2005). Algunos métodos requieren muchos datos e imponer supuestos que pueden ser limitantes, como es el caso del análisis coste-beneficio. Otros requieren el cómputo de variables externas (como pueden ser los efectos distributivos de una regla de reparto). Y otros pueden aplicarse, midiendo sobre la unidad de análisis la eficacia en la consecución de unos resultados (por ejemplo, el beneficio o el ahorro de agua en una comunidad de riego).

En los capítulos anteriores se han analizado desde un punto de vista económico diversos instrumentos de gestión del agua en el regadío. En concreto, se han estudiado las tarifas y el reparto de dotaciones bajo condiciones de escasez, así como la rentabilidad de las modernizaciones. Los análisis realizados han permitido definir propuestas de utilidad para la toma de decisiones, tanto para los regantes individuales como para la Administración. Los métodos desarrollados pueden ser utilizados para la evaluación prospectiva de políticas de precios y asignación del agua, así como de proyectos de modernización de regadíos. Pero también pueden emplearse para su revisión retrospectiva: ver si son acertadas y funcionan adecuadamente, demostrar su potencial de mejora, sugerir su extensión a otras zonas, justificar los gastos presupuestados o los ya ejecutados y estimar los efectos de inversiones futuras.

Así, en lo que se refiere a la modernización de regadíos, se analiza de forma cuantitativa en qué medida una inversión y un incremento en el uso de la energía compensan o no un ahorro de agua o un incremento en los márgenes de explotación. Esta cuestión se reduce a ver si se está a un lado o a otro de un punto de igualdad de costes y beneficios, lo cual equivale a saber si interesa o no la modernización. Si se está muy lejos de dicho punto de igualdad, los efectos de la siempre existente incertidumbre podrán ser menos relevantes. Tras una modernización, se plantean así mismo nuevos objetivos que la harían rentable, ya sea a través de la mejora de la eficiencia de riego o de los márgenes de explotación.

Por otra parte, ante una situación de escasez, se determinan las repercusiones económicas de distintos criterios de reparto. En concreto, se desarrolla matemáticamente y se aplica el método de reparto óptimo, que minimiza las pérdidas de beneficio en una comunidad u organización colectiva de riego. También se simula un mercado interno de agua, el cual podría y debería llegar a la misma solución, aunque en la práctica pueda no ser así, debido a factores como los costes de transacción y la información de que disponga el gestor para efectuar el reparto. La solución obtenida, usando variables adimensionales y lógicas, permite comparar las pérdidas que se obtendrían de aplicar otras reglas de reparto, como la proporcional, tanto para la comunidad de riego como para sus comuneros.

La solución del reparto óptimo permite además obtener el coste marginal del agua o el precio que cada regante o conjunto de regantes estarían dispuestos a pagar por recibir recursos de otras fuentes o mercados. Así mismo, la representación gráfica de la solución aporta una información valiosa para el regante y la comunidad, al mostrar su comportamiento o su realidad. Esto puede ayudar a prepararse ante situaciones de escasez, aportando una visión que ilustra el coste de oportunidad en beneficios perdidos asociados a un marco de reparto ineficiente. Ese mismo valor o coste marginal del agua es fundamental para fijar tarifas eficientes, así como para analizar la rentabilidad de las modernizaciones.

Las tarifas que se apliquen al agua, aunque tengan por misión fundamental la de recuperar los costes de las infraestructuras y los servicios del agua, tienen además una repercusión importante en los márgenes de las explotaciones y en el uso del agua. Como consecuencia, deben servir para ayudar a conseguir un uso eficiente y sostenible de este recurso escaso. En este sentido, al regante medio y al conjunto de la sociedad les interesa un sistema de tarifas progresivas, que desincentive aquellos riegos con los que se obtienen bajos beneficios marginales. Para fijar estas tarifas es necesario disponer de información adecuada de dotaciones, necesidades hídricas y beneficios de explotación.

En los métodos presentados es fundamental conocer la curva de respuesta de los cultivos al agua aplicada. Para ello, se proponen expresiones con suficientes grados de libertad como para ajustar los datos reales, y un método sencillo para su determinación, el cual precisa un único punto. Esto no es óbice para que, con el tiempo, la información se perfeccione con otros métodos más precisos. Por ello, conviene promover el uso generalizado y la continua adaptación de esta información. La misma podría ser recabada por las comunidades de

regantes, con la ayuda y el incentivo de algún organismo público.

Además de las funciones de beneficio específico por cultivo, se precisa contabilizar el agua que es realmente utilizada. Las dificultades para medir con precisión estas variables invitan a buscar maneras de gestionar la incertidumbre, lo cual se ha hecho en uno de los trabajos (capítulo 5.2). Otro obstáculo para la aplicación práctica de los instrumentos económicos estudiados es que se exige una redefinición de los derechos de uso del agua o un acuerdo interno entre sus titulares. En el caso del reparto óptimo, dicho acuerdo pasa por aceptar que los colectivos de riego busquen el mayor beneficio conjunto, como si estuviesen constituidos por un único comunero. Ante esto, cabe esperar la oposición de aquellos que pudieran verse perjudicados, siendo conveniente pues analizar los efectos redistributivos del reparto. No obstante, el método propuesto puede ser empleado tanto en una comunidad como en las distintas orientaciones productivas de un mismo agricultor.

Algunos aspectos no considerados pueden tener incidencia en los resultados o en la toma de decisiones. En especial, cabe mencionar los aspectos sociales y ambientales, que, aunque han sido esbozados, no han sido integrados en los análisis económicos. Por ejemplo, los destinos y los retornos del agua usada, tanto en su cantidad como en su calidad. Aunque se aparte de los objetivos de esta tesis, una adecuada valoración de estos últimos se hace cada vez más necesaria. Igualmente, podría ser interesante añadir análisis cualitativos a las evaluaciones cuantitativas realizadas, por ejemplo, mediante encuestas a los regantes, que informasen sobre su grado de aceptación a las iniciativas estudiadas.

8. CONCLUSIONES

8.1. Conclusiones generales

Los análisis realizados en esta tesis, apoyados en estudios de caso, refuerzan la idea extendida de que los sistemas de tarificación y asignación del agua de riego facilitan el uso eficiente y sostenible de este recurso. Pueden disuadir al regante de aplicar volúmenes de riego excesivos, promover la búsqueda de un mayor beneficio para el conjunto de los usuarios y, a su vez, facilitar la recuperación de los costes de los servicios del agua.

Para establecer tarifas y adoptar criterios de asignación, y también para analizar la viabilidad de la modernización de los regadíos, es de gran interés conocer el valor productivo del agua aplicada en las distintas explotaciones. La determinación analítica realizada para relacionar el agua disponible con su beneficio marginal puede orientar a una comunidad y a una empresa de regadío sobre la conveniencia de invertir en infraestructuras que aumenten la disponibilidad de agua, acceder a nuevos recursos hídricos o, por el contrario, venderlos a otros usuarios que puedan obtener más rentabilidad de ellos. Como consecuencia, convendría extender el uso de funciones dosis-respuesta como las propuestas, fáciles de determinar con pocos datos. No obstante, debería instituirse una sistemática para mejorar la información necesaria y su continua adaptación.

Como además se ha documentado en muchas zonas regables, las tarifas resultan insuficientes cuando la respuesta de la demanda al precio es inelástica, siendo entonces necesario actuar sobre las asignaciones o el reparto de agua. También lo es para considerar aspectos como los ambientales, de difícil valoración económica. Las asignaciones socialmente óptimas deberían, en la medida de lo posible, establecerse en función de los costes ambientales y de oportunidad que conllevan, es decir, del conjunto de externalidades que ocasiona el uso del agua.

Con objeto de que unas nuevas asignaciones y tarifas sean mejor aceptadas por los agricultores, es conveniente vincularlas a otras actuaciones, tales como la inversión en infraestructuras y equipamientos de riego, que permitan aprovechar mejor el agua; la reorientación hacia cultivos más rentables y/o con menores necesidades hídricas; y la

introducción de riegos deficitarios. Por eso, es conveniente aprovechar otros instrumentos complementarios, tales como los servicios de asesoramiento al regante y los sistemas de información agroclimática.

Las reglas de asignación analizadas, la tarificación del agua y la evaluación de inversiones permitirían a una comunidad de regantes o a los gestores del agua contar con instrumentos útiles para la toma de decisiones. Los análisis y las propuestas de la tesis pueden ayudar a encontrar aquellos instrumentos que, ante una reducción de la disponibilidad de agua, produzcan el menor perjuicio para los regantes. Los estudios de caso realizados han mostrado que los métodos propuestos son potencialmente útiles para ahorrar agua, repartir de manera eficiente el agua disponible, justificar o seleccionar inversiones en modernización de regadíos y evaluar los costes o beneficios marginales del recurso, y, con ello, valorar el interés de acometer soluciones alternativas.

8.2. Conclusiones sobre la tarificación del agua de riego

De la revisión y análisis de los principales sistemas de tarificación, se concluye que, para establecer tarifas, es conveniente fijar primero unas dotaciones objetivo, específicas para cada cultivo y zona, además de tener caracterizadas las funciones de beneficio en respuesta al agua aplicada. Ello supone establecer criterios endógenos de fijación de tarifas: la tarifa es subsidiaria de una determinación previa de la disponibilidad, la cual viene establecida por la autoridad del agua (organismos de cuenca).

Las tarifas volumétricas progresivas, por tramos de consumo, pueden ser eficientes para que no se sobrepasen las dotaciones objetivo. Su eficiencia radica en gravar el consumo excesivo conforme al beneficio que se obtendría del mismo. Este tipo de tarifas permitiría adaptarse a la disponibilidad de agua en cada momento y disuadir su despilfarro. Un sistema de tarifa única que disuadiera al regante de un consumo excesivo le sería más costoso que un sistema progresivo, y, en particular, que cualquiera de los dos sistemas aquí propuestos, que consideran el beneficio marginal del agua. De ahí que concluyamos que tienen un mayor potencial las tarifas progresivas y recomendamos su aplicación, sobre una adecuada base normativa que podría requerir un cambio en la legislación de aguas.

8.3. Conclusiones sobre la asignación, el reparto óptimo y los mercados de agua

La imposición de una misma asignación por hectárea para todo un colectivo de riego no es eficiente si éste es heterogéneo. Un sistema de asignación específico por cultivo –y que incluso diferenciara dotaciones para un mismo cultivo–, el cual tuviera en cuenta la consiguiente variación en los márgenes de explotación, repercutirá unas menores pérdidas económicas para el conjunto del colectivo. El posible inconveniente de tener que medir las diferentes asignaciones según los usos dentro de una misma explotación se soslaya ponderando las dotaciones objetivo de esos usos por su superficie, de modo que bastaría el control volumétrico del agua utilizada en toda la explotación.

Se han analizado, aplicado y comparado cinco reglas de asignación del agua de riego. La regla de asignación única y el reparto proporcional están muy extendidos, tal vez porque sean fáciles de aplicar y se consideren justos en muchas comunidades. Sin embargo, otras reglas pueden resultar más eficientes, desde un punto de vista económico. Se han propuesto dos reglas, por las que se igualan las pérdidas de los regantes, ya sean éstas absolutas o relativas a sus beneficios iniciales. Y, por último, el reparto óptimo, con el cual se maximiza el beneficio económico de un colectivo de riego. Las formulaciones hechas para el reparto de agua con estas cinco reglas han resultado sencillas, con el apoyo de variables adimensionales y variables lógicas, pudiéndose implementar en hojas de cálculo. Por ello, se considera que podrían ser fácilmente aplicadas por un técnico de una comunidad de regantes, de una empresa agraria o de un servicio de asesoramiento al regante.

Un estudio de caso genérico y calibrado a partir de datos reales y otro que toma como referencia la comunidad de regantes nº V de los Riegos de Bardenas, han mostrado que el reparto óptimo, con el criterio del mayor beneficio conjunto, puede resultar significativamente más eficiente que la regla proporcional y que la asignación de una dotación única y las reglas que se basan en la equiparación de pérdidas individuales. Las diferencias serán mayores, cuanto mayor sea la heterogeneidad de los cultivos y cuanto más se tomen en cuenta los factores técnicos, económicos y ambientales existentes. Sólo cuando las producciones sean similares, las dotaciones elevadas y el precio del agua reducido, esas diferencias serán mínimas.

Una comunidad de regantes o empresa que introdujera la regla del reparto óptimo podría además prever los recortes de agua en las distintas parcelas, e incluso saber cuáles se deberían quedar sin agua, a causa de su menor rentabilidad. Este aspecto podría ser de gran interés, si se tuvieran estimaciones aceptables del volumen disponible en cada campaña, puesto que permitiría alertar a los agricultores y prepararles para una posible restricción, con la suficiente antelación como para poder planificar y adaptar sus explotaciones.

La curva de beneficio marginal en función del agua disponible, que se obtiene de la aplicación de la regla del reparto óptimo, puede servir de referencia para estudiar la posibilidad y conveniencia de incrementar los recursos hídricos. Igualmente, el coste marginal de la solución puede dar una idea del precio del agua en un mercado.

En teoría, disponiendo de una información completa sobre la productividad del agua, particular para cada clase de cultivo, un mercado de agua ideal y la regla del reparto óptimo conducirán a la misma solución. Pero cabe suponer que un mercado se adapte mejor a una situación de información incompleta y a situaciones específicas y no previstas. En general, los mercados serán más activos allí donde y cuando los recursos hídricos sean lo suficientemente escasos y valiosos.

El estudio de caso para la comunidad V de Riegos de Bardenas ha mostrado que unos costes de transacción moderados no impedirían alcanzar eficiencias cercanas a la del reparto óptimo; aunque, a diferencia de éste, no se requeriría tener una información centralizada de la productividad del agua. Se ha visto a su vez que, incluso cuando los costes de transacción son elevados, el mercado mejoraría el reparto subóptimo al que se llegaría mediante la aplicación de reglas como la asignación única o la proporcional.

8.4. Conclusiones sobre la modernización de regadíos

El análisis coste-beneficio llevado a cabo en el epígrafe 6.1. ha permitido valorar los beneficios de explotación, el ahorro y la productividad del agua que se alcanzarían con un cierto proyecto de sustitución del riego por gravedad en riego localizado en la zona del Genil, M.I. Este tipo de proyectos puede considerarse típico en muchas zonas regables de España, a tenor de la revisión efectuada. El análisis se ha hecho teniendo en cuenta ciertos

aspectos, de los cuales la reorientación productiva y el cambio del sistema de aplicación en parcela han resultado decisivos para el éxito económico de aquel.

Por otro lado, se ha propuesto y aplicado un método general para estudiar la viabilidad de las modernizaciones, considerando igualmente las diferencias entre una situación inicial y otra final, en el uso del agua y en los beneficios de explotación, y también en cuanto al uso de la energía. El método es sencillo de aplicar, si bien exige algunos datos cuya precisión es difícil de valorar. Se basa en establecer relaciones de igualación entre dos variables en estudio, de forma tal, que el posicionamiento en cada caso concreto por encima o por debajo de un punto de igualación, nos informe de si una cierta inversión es o no conveniente. En la medida en que se esté más lejos de ese punto de igualación, la incertidumbre de los datos de partida tendrá una menor incidencia.

La aplicación de este último método al caso concreto de la transformación de riegos por gravedad en riegos localizados, considerando costes y rendimientos de riego medios para España, ha permitido realizar un primer análisis, que da resultados concluyentes sobre las posibles condiciones que deberían darse para poder justificar económicamente las inversiones, y, con ello, orientar sobre su conveniencia. Así, permite discernir a partir de qué rendimientos y qué beneficios, y hasta qué inversiones y qué consumos de energía, la modernización estaría justificada. E igualmente, si ahorrar agua es más eficiente económicamente que recurrir a recursos alternativos. Igualmente, con este método se pueden determinar los nuevos márgenes que se precisarían para rentabilizar modernizaciones ya realizadas.

De los análisis realizados, se ha visto que, para no reducir el beneficio de los regantes, recuperar los costes financieros de los servicios del agua y no aumentar su uso consuntivo, puede ser necesario introducir cultivos de mayor rentabilidad y/o menores necesidades hídricas. Con los costes medios considerados, se concluye que probablemente en algunas zonas de España no estaba justificada la transformación de riegos por gravedad en riegos localizados. La misma es cuestionable para ahorrar agua, porque el coste atribuible al agua ahorrada no puede ser compensado con el beneficio que podría obtenerse, a no ser que los rendimientos del método tradicional sean bajos o las necesidades de riego elevadas. Dicho coste incluso podría ser superior al de un recurso alternativo, como el agua desalada. En

consecuencia, podrían ser de un mayor interés, según los casos, otras opciones técnicas más económicas, como la adecuación o mejora de sistemas de riego por gravedad.

Los análisis realizados se deberían completar con el estudio de los retornos y otros aspectos ambientales, como la posibilidad de reutilizar el agua no consumida. Así mismo, sería conveniente revisar los derechos de asignación, en función de los rendimientos de riego, al objeto de reducir el consumo no productivo del agua. Y estudiar si los riegos deficitarios tienen o no mucha repercusión sobre la producción final, en tanto que permitirían ahorrar más agua. En este sentido, el asesoramiento a los regantes puede ser una medida de acompañamiento importante a la modernización.

9. EXTENSIONES

Las conclusiones a las que se ha llegado en la tesis invitan a elaborar un estudio más complejo y detallado, que tuviera en cuenta aquellos aspectos no abordados en la misma, como, por ejemplo, las externalidades ambientales o la aceptación social de las políticas propuestas. En el caso de las externalidades, es evidente que el cambio en los criterios de reparto o tarificación del agua son susceptibles de modificar el patrón de cultivos y las técnicas de riego, mitigando o agravando los impactos ambientales. Esto podría constituir por tanto una clara extensión de esta tesis.

Por otro lado, es evidente que ninguna reforma de un sistema de asignación o tarificación del agua de riego podría progresar y llevarse a la práctica sin la aceptación de los regantes. Máxime cuando lo que se propone podría dar lugar a resultados redistributivos de su renta. Por tanto, sería interesante extender el estudio al ámbito de la acción colectiva y la investigación psicosociológica, para así evaluar las medidas propuestas desde esta doble perspectiva.

En otra línea, en nuevos estudios que aportaran robustez y validación a las conclusiones de esta tesis, serán valores de referencia indispensables el beneficio que puede obtenerse del agua para sus diferentes usos, así como los costes de producción, los costes de la modernización e incluso los costes de las fuentes alternativas, como la desalación o cualquier otra técnica que permita transformar un agua improductiva en productiva. En la medida en que todos esos aspectos puedan precisarse mejor, los análisis y las valoraciones que se hagan, así como las decisiones que se tomen, serán más adecuadas. Porque, aunque el agua sea un recurso especial, difícil de contabilizar, y sus usos difíciles de caracterizar, su valoración económica y su gestión eficiente parecen posibles.

10. REFERENCIAS

- ACUAMED (2006a). Informe de viabilidad de la Actuación 2.1.e. Nueva desaladora de Águilas/Guadalentín. Ampliación de la desaladora de Águilas (planta desaladora para el riego en Murcia). Aguas de las Cuencas Mediterráneas, S.A. (ACUAMED).
- ACUAMED (2006b). Informe de viabilidad de la Actuación 2.1.B. Planta desaladora para garantizar los regadíos del trasvase Tajo – Segura. Aguas de las Cuencas Mediterráneas, S.A. (ACUAMED).
- ACUASEGURA (2007). Desalinizadora de Valdelentisco, en Cartagena (Murcia). Informe de viabilidad. Aguas de las Cuencas del Segura (ACUASEGURA).
- Adler J.H. (2009). Warming up to water markets. Regulation, winter 2008-2009: 14-17. CATO Institute.
- Ahmad M.D., Giordano M., Turrall H., Masih I. y Masood Z. (2007). At what scale does water saving really save water? Lessons from the use of resource conservation technologies in Pakistan. *Journal of Soil and Water Conservation* 62:29A–35A.
- Albiac J., Hanemann M., Calatrava J., Uche J. y Tapia J. (2006). The rise and fall of the Ebro water transfer. *Natural Resources Journal* 46: 727–758.
- Alcott B. (2005). Jevons' paradox. *Ecological Economics* 54(1): 9–21.
- Alcott B. (2008). Historical overview of the Jevons paradox in the literature. En J.M. Polimeni, K. Mayumi, M. Giampietro (eds.), *The Jevons paradox and the myth of resource efficiency improvements*. Earthscan. Londres, 7–78.
- Alexander P. y Potter M. (2004). Benchmarking of Australian irrigation water provider businesses. *Irrigation and Drainage* 53: 165–173.
- Allan T. (1999). Productive Efficiency and Allocative Efficiency: Why Better Water Management May Not Solve the Problem. *Agricultural Water Management* 40: 71-75.
- Altmann D. (2007). Marginal cost water pricing: welfare effects and policy implications using minimum cost and benchmarking models, with case studies from Australia and Asia. PhD thesis. School of Economics, University of Adelaide, Australia.
- Anderson T.L. (1982). The new resource economics: old ideas and new applications, *American Journal of Agricultural Economics* No. 5, December.
- Arriaza M., Gómez-Limón J.A. y Upton M. (2002). Local water markets for irrigation in southern Spain: A multicriteria approach. *Australian Journal of Agricultural and Resources Economics* 46 (1): 21-43.
- Babel M.S., Das Gupta A. y Nayak D.K. (2005). A model for optimal allocation of water to competing demands. *Water Resources Management* 19: 693-712.
- Banco Mundial (2006). Reengaging in agricultural water management: challenges, opportunities, and trade-offs. Water for Food Team, Agriculture and Rural Development Department (ARD). World Bank, Washington, DC.

- Bandaragoda D.J. (1998). Design and Practice of Water Allocation Rules: Lessons from Warabandi in Pakistan's Punjab. *International Irrigation Management Institute Research Report 17*: 1-25. Colombo, Sri Lanka.
- Basso L. (1994). Los retornos salinos del polígono de riego Bardenas I y su contribución a la salinización de los ríos Arba y Riguel. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. 224 pp.
- Bate R. (2002). Water - can property rights and markets replace conflict? En: Morris J. (ed), *Sustainable development: promoting progress or perpetuating poverty?* Profile Books, London.
- Beare S., Heaney A. y Mues C. (2003). Water rights, transaction costs and policy reform. Abare Conference Paper 03.10.
- Benjamin J.R. y Cornell C.A. (1970). *Probability, Statistics and Decisión for Civil Engineers*. McGraw-Hill Book Company. New York.
- Benli B. y Kodal S. (2003). A non-linear model for farm optimization with adequate and limited water supplies: Application to the South-East Anatolian Project (GAP) Region. *Agricultural Water Management* 62(3): 187-203.
- Berbel J. (2010). Análisis de precios y gestión de la demanda de agua. Curso en Ingeniería y Gestión Sostenible de Regadíos 2010. Centro Nacional de Tecnologías de Regadíos. S. Fernando de Henares (Madrid).
- Berbel J. y Gómez-Limón J.A. (2000). The impact of water-pricing policy in Spain: an analysis of three irrigated areas. *Agricultural Water Management* 43, 219-238.
- Berbel J. y Gutiérrez C. (2004). I Informe sobre la Sostenibilidad del Regadío. Feragua. España.
- Berbel J. y Gutiérrez C. (eds.) (2005). *Sustainability of European Irrigated Agriculture under Water Framework Directive and Agenda 2000*. EUR 21220. Office for Official Publications of the European Communities. Luxemburgo.
- Berbel J., Calatrava J. y Garrido A. (2007a). Water Pricing and Irrigation: A review of the European Experience. En: F. Molle, J.J. Berkkoff y R. Barker (eds.), *Irrigation Water pricing Policy in Context: exploring the Gap between Theory and Practice*. Wallingford, UK: CABI. Cap. 13: 295-327.
- Berbel J., Kolberg S., Rodríguez Díaz J.A. y Montesinos P. (2007b). EU Water saving potential II, final report (ENV.D.2/ETU/2007/0001r). Ecologic - Institute for International and European Environmental Policy, University of Kassel, Berlin.
- Berbel J., Viaggi D. y Manos B. (2009). Estimating demand for irrigation water in European Mediterranean countries through MCDM models. *Water Policy* 11(3), 348-361.
- Blanco-Gutiérrez, I., Varela-Ortega, C. y Flichman, G. (2011). Cost-effectiveness of groundwater conservation measures. A multi-level analysis. *Agricultural Water Management* 98: 639-652.
- BOE (2001a). Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. Boletín Oficial del Estado nº 161, de 6/07/2001.
- BOE (2001b). Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. Boletín Oficial del Estado nº 176, de 24/07/2001.

- BOE (2006). Real Decreto 287/2006, de 10 de marzo, por el que se regulan las obras urgentes de mejora y consolidación de regadíos, con objeto de obtener un adecuado ahorro de agua que palie los daños producidos por la sequía. Boletín Oficial del Estado nº 60, de 11/03/2006.
- BOE (2007a). Orden MAM/698/2007, de 21 de marzo, por la que se aprueban los planes especiales de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía en los ámbitos de los planes hidrológicos de cuencas intercomunitarias. Boletín Oficial del Estado nº 71, de 23/03/2007.
- BOE (2007b). Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica. Boletín Oficial del Estado nº 227, de 18/09/2010.
- BOE (2008). Orden Ministerial ARM/2656/2008, de 10 de Septiembre, por la que se aprueba la Instrucción de Planificación Hidrológica. Boletín Oficial del Estado nº 229, de 22/09/2008.
- BOE (2009). Orden por la que se regulan los sistemas para realizar el control efectivo de los volúmenes de agua utilizados por los aprovechamientos de agua del dominio público hidráulico, de los retornos al citado dominio público hidráulico y de los vertidos al mismo. Boletín Oficial del Estado nº128, de 27/05/2009.
- BOJA (2010). Ley 9/2010, de 30 de julio, de Aguas para Andalucía. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía nº 155, de 9 de agosto de 2010.
- BON (2003). Decreto Foral 59/2003, de 24 de marzo, por el que se aprueba el reglamento de desarrollo de la Ley Foral 1/2002, de 7 de marzo, de infraestructuras agrícolas. Boletín Oficial de Navarra nº 44, de 9/04/2003.
- Bosworth B., Cornish G., Perry C. y van Steenberg F. (2002). Water charging in irrigated agriculture. Lessons from the literature. Report OD 145. HR Wallingford. 90 pp.
- Burchi S. (2004). Water laws for water security in the twenty-first century. En J. Trottier y P. Slack (eds.), *Managing Water Resources: Past and Present*. Oxford University Press, Oxford, pp 117–129.
- Burt C.M. (2007). Volumetric irrigation water pricing considerations. *Irrigation and Drainage Systems* 21(2): 133-144.
- Burt C.M. y Styles S.W. (1999). Modern water control and management practices in irrigation. Impact on performance. *FAO Water Reports* No. 19. FAO, Roma, Italia. 223 pp.
- Calatrava J. y Garrido A. (2006). Difficulties in adopting formal water trading rules within user's associations. *Journal of Economic Issues* 40(1): 27-44.
- Calatrava J. y Garrido A. (2010). Measuring irrigation subsidies in Spain: an application of the GSI method for quantifying subsidies. Global Subsidies Initiative (GSI), International Institute for Sustainable Development (IISD). Ginebra. En http://www.globalsubsidies.org/files/assets/irrig_Spain.pdf (visitado por última vez el 21/06/2014).
- Camacho E. (2005). Análisis de la eficiencia y el ahorro de agua en el regadío de la Cuenca del Guadalquivir. *Agricultura: Revista Agropecuaria* 880: 880-887.
- Camacho E. (2012). La modernización de regadíos: Ahorro de agua versus incremento en el consumo de energía. Jornada técnica sobre coste energético y producción de energía en comunidades de regantes. FENACORE, Madrid, 28 de marzo de 2012.

- Carrión P., López E., Ortega J.F. y de Juan A. (2003). Optimización mediante algoritmos genéticos de la gestión del agua en el regadío. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y el Diseño en Ingenierías*, 19(4) : 447-462. UPC
- Causapé J., Quílez D. y Aragüés R. (2004a). Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level – I. Irrigation quality. *Agricultural Water Management* 70(3): 195-209.
- Causapé J., Quílez D. y Aragüés R. (2004b). Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level - II. Salt and nitrate loads in irrigation return flows. *Agricultural Water Management* 70(3): 211-228.
- CEDEX (1988). Determinación de las dotaciones de riego en los planes de regadío de la Cuenca del Guadalquivir. Anejo II. Informe parcial nº 1. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid.
- CEDEX (2013). Proyecto I+D sobre Caracterización de medidas en materia de regadío que contribuyan a la consecución del buen estado de las aguas, e indicadores de eficacia y sostenibilidad. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid.
- Chaharbaghi K. y Lynch R. (1999). Sustainable competitive advantage: towards a dynamic resource-based strategy. *Management Decision* 37(1): 45-50.
- CHG (2009). Proyecto modificado nº 1 de Modernización de la Zona Regable del Genil Margen Izquierda 2ª Fase, del término municipal de Palma del Río (Córdoba). Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Sevilla.
- CHG (2010). Documento del taller territorial: Tramo Medio del Guadalquivir y Bajo Genil. Plan Hidrológico de la Demarcación del Guadalquivir. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. En http://www.chguadalquivir.es/export/sites/default/portalchg/planHidrologicoDemarcacion/demarcacionGuadalquivir/primerCicloPlanificacion/planHidrologicoGuadalquivir2009-2015/talleresJornadas/ficheros/taller11_documento2_documento_trabajo.pdf (visitado por última vez el 29/03/2014).
- Chohin-Kuper A., Rieu T. y Montginoul M. (2002). Les outils économiques pour la gestion de la demande en eau en Méditerranée. Séries Irrigation "Rapports" 2002-2006; 1081 Cemagref.
- Coase R.H. (1960). The problem of social cost. *Journal of Law and Economics* 3:1- 44.
- Colby B.G., McGinnis M.A. y Ken A.R. (1989). Procedural aspects of state water law: transferring water rights in the western states. *Arizona Law Review* 31.
- Colino J. y Martínez J.M. (2007). Productividad, disposición al pago y eficiencia técnica en el uso del agua: la horticultura intensiva de la Región de Murcia. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 7(14): 109-125.
- Cornish G.A. y Perry C.J. (2003). Water charging in irrigated agriculture: lessons from the field. Report OD 150. HR Wallingford Ltd., Wallingford, UK.
- Cornish G., Bosworth B., Perry C. y Burke J. (2004). Water charging in irrigated agriculture: An analysis of international experience, *Water Rep.* 28, FAO. Roma.
- Corominas J. (2010). Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad. *Ingeniería del Agua* Vol. 17, No 3, Septiembre 2010.

- Cots L. (2011). Desarrollo y calibración de un modelo de simulación de recursos hídricos aplicado a la cuenca del río Corb, dentro de la Zona Regable de los Canales de Urgell (Lleida). Tesis Doctoral. Universidad de Lleida.
- CRVRB (2011). Memoria de la Comunidad de Regantes nº V de los Riegos de Bardenas 2010. <http://www.comunidadv.com/> (visitado por última vez el 16/08/2013).
- CRVRB (2012). Memoria de la Comunidad de Regantes nº V de los Riegos de Bardenas 2011. <http://www.comunidadv.com/> (visitado por última vez el 16/08/2013).
- CRVRB (2013). Memoria de la Comunidad de Regantes nº V de los Riegos de Bardenas 2012. <http://www.comunidadv.com/> (visitado por última vez el 16/08/2013).
- Cummings R.G. y Nercissiantz V. (1992). The use of water pricing as a means for enhancing water use efficiency in irrigation: case studies in Mexico and the United States. *Natural Resources Journal*, Fall, No. 4.
- Curie M.M. (1985). A distinct policy which forms a market within the California State Water Project. *Water Resources Research*. November, No. 11.
- Daimiel A. (2010). Plantación intensiva de olivar regada por goteo (en Valdoro, Ciudad Real). En <http://www.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/trabajos/Daimiel%20Amparo.ppt> (visitado por última vez el 20/07/2014).
- Dechmi F., Playán E., Faci J.M. y Tejero M. (2003). Analysis of an irrigation district in northeastern Spain: I: Characterisation and water use assessment. *Agricultural Water Management* 61: 75-92.
- Díaz Barcos A. (2001). Beneficios derivados de la modernización de regadíos. El ejemplo de Caparroso (Navarra). *Navarra Agraria* Nº 126: 46-50.
- Dinar A. y Subramanian A. (1997). Water pricing experiences: an international perspective. *World Bank Technical Paper* No. 386: 1-12. Washington DC, World Bank.
- Dinar A., Rosegrant M.W. y Meinzen-Dick R. (1997). Water Allocation Mechanisms: Principles and Examples. *World Bank Policy Research Working Paper* 1779. Washington DC, World Bank.
- Dinar A., Balakrishnan T.K. y Wambia J. (1998). Political Economy and Political Risks of Institutional Reform in the Water Sector. *World Bank Policy Research Paper* 1987. Washington DC, World Bank.
- Dinar A. y Maria Saleth R. (2005). Issues in water pricing reforms: from getting correct prices to setting appropriate institutions. En: Folmer H. y Tietenberg T. (eds), *The international yearbook of environmental and resource economics 2005/2006*. Edward Elgar, Cheltenham.
- Dono G., Giraldo L. y Severini S. (2012). The Cost of Irrigation Water Delivery: An Attempt to Reconcile the Concepts of Cost and Efficiency. *Water Resources Management* 26(7): 1865-1877.
- DOUE (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial de la Unión Europea nº L 327 de 22/12/2000.
- Dumont A., Mayor B. y López-Gunn E. (2013). Is the rebound effect or Jevons paradox a useful concept for better management of water resources? Insights from the irrigation modernisation

- process in Spain. At the Confluence - Selection from the 2012 World Water Week in Stockholm. *Aquatic Procedia* Vol. 1, 2013: 64–76.
- Easter K.W. (1994). Water markets: opportunities and concerns: seminar report, Water policy and water markets. Selected papers and proceedings from the World Bank's Ninth Annual Irrigation and Drainage Seminar, Annapolis, Maryland, December 8-10, 1992. Le Moigne G., Easter K.W., Ochs W.J. y Giltner S. (eds.), Technical Paper Number 249, The World Bank, Washington, D.C.
- Easter K.W., Becker N. y Tsur Y. (1997). Economic Instruments for Water Resource Management. En A.K. Biswas (ed.), *Water Resources: Environmental Planning, Management and Development*. McGraw-Hill Pub. Co., Nueva York. 1997: 579-621.
- ECOLOGIC (2007). EU Water saving potential (Part 1 –Report). 19 de Julio de 2007. Ecologic Institute for International and European Environmental Policy, Berlín.
- Ederra I. (2010). Eficiencia energética en el regadío. Jornada INTIC de interés profesional sobre innovación e ingeniería del agua: nuevas oportunidades y tendencias, 8 de abril de 2010. Madrid.
- EEA (2012). Towards efficient use of water resources in Europe. European Environment Agency Report, No 1/2012.
- Freebairn J. y Quiggin J. (2006). Water rights for variable supplies. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 50(3):295-312.
- EPDAP (2005). Estructura de Costes de Cultivo de Regadío en Andalucía. Empresa Pública de Desarrollo Agrario y Pesquero, Sevilla.
- ESTEPA (2010). Los regadíos históricos españoles. Paisajes culturales, paisajes sostenibles. J. Hermosilla (Director). Unidad de Investigación Estudios del Territorio, del Paisaje y del Patrimonio. Universidad de Valencia y Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- FAO (1977). Preparado por Doorenbos J. y Pruitt W.H. Crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 24. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- FAO (2012). Crop yield response to water. *FAO irrigation and drainage paper* 66. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- FAO (2014a). Software AquaCrop. En http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_aquacrop.html (visitado por última vez el 6/04/2014). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- FAO (2014b). Software CropWat. En http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html (visitado por última vez el 6/04/2014). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- Faysse N. (2003). Allocating irrigation water: the impact of strategic interactions on the efficiency of rules. *European Review of Agricultural Economics* 30(3): 305-332.
- Fernández Buckley D. (2001). Informe sobre la situación del mercado del agua y tecnologías relacionadas en Israel (online). Disponible en <http://www.icex.es/servicios/documentacion/documentoselaborados/icex/pdfs/agua.pdf> (visitado por última vez el 20/12/2011).
- Fernández García I., Rodríguez Díaz J.A., Montesinos P., Camacho E. y Berbel J. (2013). La modernización de regadíos: repercusiones sobre el uso del agua y la energía en CCRR de

- Andalucía. XXXI Congreso Nacional de Riegos (AERYD), Orihuela (Alicante), 18-20 de Junio de 2013.
- Ferrer G. y La Roca F. (2006). El papel de la economía en el desarrollo e implementación de la Directiva Marco del Agua. Ambigüedad conceptual y problemas prácticos (online). Disponible en: <http://www.ucm.es/info/ec/jec10/ponencias/407ferrerlaroca.pdf> (visitado por última vez el 20/12/2011).
- Fuentes A. (2011). Policies towards a sustainable use of water in Spain. OECD Economics Department Working Papers, No. 840, OECD Publishing, Paris.
- Gallego-Ayala J., Gomez-Limón J.A. y Arriaza M. (2011). Irrigation water pricing instruments: a sustainability assessment. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9(4): 981-999.
- García Mollá M. (2002). Análisis de la influencia de los costes en el consumo de agua en la agricultura valenciana. Caracterización de las entidades asociativas para riego. Tesis doctoral. Departamento de Economía y Ciencias Sociales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Garrido A., Palacios E., Calatrava J., Chávez J. y Exebio A. (2004). La importancia del valor, costo y precio de los recursos hídricos en su gestión. Biblioteca Virtual, Cuadernos FODEPAL. En: https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.conecta-ceddet.org%2Findex.php%3Fopcion%3Dcom_k2%26view%3Ditem%26task%3Ddownload%26id%3D333%26Itemid%3D283%26lang%3Dfr&ei=BxLMU9bbGYSa1AWy04DwAg&usg=AFQjCNGWhxeCSDHpiZ4cwMUGUkSf2fg7vws&ig2=0-6_mq3STHtnzCNdJeaA_A&bvm=bv.71198958,d.d2k (visitado por última vez el 20/07/2014).
- Garrido A. y Calatrava J. (2010). Trends in water pricing and markets. En Garrido A. y M.R. Llamas (eds.), *Water policy in Spain*. Taylor & Francis, Londres, pp. 131-144.
- Garrido A., Rey D. y Calatrava J. (2012). Water trading in Spain. En L. De Stefano y M.R. Llamas (eds.), *Water, Agriculture and the Environment in Spain: Can we square the circle?* Fundación Botín, pp. 205-216.
- Gobierno de Aragón (2012). Anuario estadístico agrario de Aragón. Departamento de Agricultura y Alimentación, Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- Goetz R.U., Martínez Y. y Rodrigo J. (2005). Eficiencia de las reglas de asignación de agua en el regadío: asignación a través de mercados, de la regla proporcional y de la regla uniforme. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 5(9): 115-138.
- Gómez-Limón J.A., Berbel J. y Peñuelas J.M. (2001). Tarificación del agua de riego: cuantificación del impacto socioeconómico y ambiental. *Revista Riegos y Drenajes* 177, 56-61.
- Gómez-Limón J.A. y Riesgo L. (2004). Water pricing: Analysis of differential impacts on heterogeneous farmers. *Water Resources Research* 40: 1-12.
- Gómez-Limón J.A., Berbel J. y Gutiérrez C. (2007). La Multifuncionalidad del regadío: una aproximación empírica. En: Gómez-Limón J.A. y Barreiro Hurlé J. (coords.), *La multifuncionalidad de la agricultura en España*. Ed.: Eumedia / Ministerio Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, 2006. Cap 12: 207-224.
- Gorantiwar S.D. y Smout K. (2007). Model for performance based land area and water allocation within irrigation schemes. *Irrigation and Drainage Systems* 20(4): 345-360.

- Grafton R.Q., Chu H.L., Stewardson M. y Kompas T. (2011). Optimal dynamic water allocation: Irrigation extractions and environmental tradeoffs in the Murray River, Australia. *Water Resources Research* 47(12): W00G08.
- Griffin R.C., Peck D.E. y Maestu J. (2013), Myths, principles and issues in water trading. En: Maestu, J. (ed.), *Water trading and global water scarcity: international experiences*. RFF Press, Routledge, Abingdon, UK, pp. 1-14.
- Groom B. y Koundouri P. (2011). The Economics of Water Resource Allocation: Valuation Methods and Policy Implications. *Water Resources Allocation. Policy and Socioeconomic Issues in Cyprus. Global Issues in Water Policy* 1: 89-109.
- Hanson B.R. (1995). Practical potential irrigation efficiencies. First International conference on Water Resources Engineering, San Antonio, TX, 14-18 de Agosto de 1995.
- Hardy L., Garrido A. y Juana L. (2012) Evaluation of Spain's Water-Energy Nexus. *Water Resources Development* 28(1): 151-170.
- Hearne R.R. e Easter K.W. (1995). Water allocation and water markets: an analysis of gains-from-trade in Chile. Technical Paper Number 315, The World Bank, Washington, D.C.
- Hellegers P. y Perry C.J. (2004). Water as an economic good in irrigated agriculture: theory and practice. Agric Econ Res Inst (LEI). Report 3.04.12. The Hague, Netherlands.
- Howe C.W., Schurmeier R.D. y Shaw Jr. W.D. (1986), Innovative approaches to water allocation: the potential for water markets. *Water Resources Research* April, No. 4.
- Huffaker R. y Whittlesey N. (2003). A theoretical analysis of economic incentive policies encouraging agricultural water conservation. *Water Resources Development* 19:37-55.
- Hughes D.A. y Mallory S.J.L. (2009). The importance of operating rules and assessments of beneficial use in water resource allocation policy and management. *Water Policy* 11: 731-741.
- Hussain I., Turrall H., Molden D. y Ahmad M.D. (2007). Measuring and enhancing the value of agricultural water in irrigated river basins. *Irrigation Science* 25:263-282.
- Iglesias E. y Blanco M. (2008). New directions in water resources Management: The role of water pricing policies. *Water Resources Research* 44(6): 1-11.
- IPCC (2007). Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Isidoro D., Quílez D. y Aragüés R. (2006a). Environmental impact of irrigation in La Violada District (Spain): I. Salt export patterns. *Journal of Environmental Quality* 35(3): 766-775.
- Isidoro D., Quílez D. y Aragüés R. (2006b). Environmental impact of irrigation in La Violada District (Spain): II. Nitrogen fertilization and nitrate export patterns in drainage water. *Journal of Environmental Quality* 35(3): 776-785.
- Jean M. 1999. Politique de tarification et application pratique: l'exemple du Canal de Provence. Trabajo presentado en la conferencia 'Pricing Water' – Lisboa, 6 y 7 Septiembre de 1999.
- Jensen M. E. (2007). Beyond irrigation efficiency. *Irrigation Science*, 25: 233-245.

- Jin L., Huang G., Fan Y., Nie X. y Cheng G. (2012). A Hybrid Dynamic Dual Interval Programming for Irrigation Water Allocation under Uncertainty. *Water Resources Management* 26(5): 1183-1200.
- Johansson R.C., Tsur Y., Roe T.L., Doukkali R.M. y Dinar A. (2002). Pricing and Allocation of Irrigation Water: A Review of Theory and Practice. *Water Policy* 4: 173-199.
- Junta de Andalucía (2002). Inventario y caracterización de los Regadíos de Andalucía (1996-2002). Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía, Sevilla.
- Kim C.S. y Schaible G.D. (2000). Economic Benefits Resulting From Irrigation Water Use: Theory and an Application to Groundwater Use. *Environmental and Resource Economics* 17(1): 73-87.
- Krinner W., García A. y Estrada F. (1994). Method for estimating efficiency in Spanish irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 120(5): 979-986.
- Krinner W. (2014). Financial Analysis of the Spanish Water Sector. *Water Resources Management* 28: 2471-2490.
- Latinopoulos D. (2008). Estimating the Potential Impacts of Irrigation Water Pricing Using Multicriteria Decision Making Modelling. An Application to Northern Greece. *Water Resources Management* 22(12): 1761-1782.
- Lecina S., Playán E., Isidoro D., Dechmi F., Causapé J. y Faci J.M. (2005). Irrigation evaluation and simulation at the irrigation district V of Bardenas (Spain). *Agricultural Water Management* 73: 223-245.
- Lecina S., Isidoro D., Playán E. y Aragüés R. (2009). Efecto de la modernización de regadíos sobre la cantidad y la calidad de las aguas: la cuenca del Ebro como caso de estudio. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid. 92 pág.
- Lecina S., Isidoro D., Playán E. y Aragüés R. (2010a). Irrigation modernization in Spain: effects on water quantity and quality. A conceptual approach. *International Journal of Water Research Development* 26(2): 265-282.
- Lecina S., Isidoro D., Playán E. y Aragüés R. (2010b). Irrigation modernization and water conservation in Spain: the case of Riegos del Alto Aragón. *Agricultural Water Management* 97: 1663-1675.
- Lee T.R. y Jouravlev A.S. (1998). Prices, property and markets in water allocation. Economic Commission for Latin America and the Caribbean, United Nations, Serie Medio Ambiente y Desarrollo nº 6, Santiago, Chile.
- Lefebvre M. (2011). Irrigation water allocation mechanisms and drought risk management in agriculture. Thesis, Université Montpellier I.
- Letcher R.A., Jakeman A.J. y Croke B.F.W. (2004). Model development for integrated assessment of water allocation options. *Water Resources Research* 40(5): W05502.
- López-Cortijo I. (2008). Una visión general de los equipamientos en parcela, como obras de interés agrícola privado. Jornada técnica sobre pivot, Estación de Viticultura y Enología de Navarra (EVENA), Olite (Navarra), 29 de abril de 2008.
- López-Gunn E., Zorrilla P., Prieto F. y Llamas M.R. (2012). Lost in translation? Water efficiency in Spanish agriculture. *Agricultural Water Management* 108: 83-95.

- Lorenzo-Lacruz J., Morán-Tejeda E., Vicente-Serrano S.M. y López-Moreno J.I. (2013). Streamflow droughts in the Iberian Peninsula between 1945 and 2005: Spatial and temporal patterns. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17: 119-134.
- Losada A. y Roldán J. (2002). Uso racional del agua de riego. En: Moral, L. del (ed.). III Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua. La Directiva Marco del Agua: Realidad y futuros. Universidad de Sevilla - Universidad Pablo de Olavide - Fundación Nueva Cultura del Agua. Sevilla.
- Lu H.W., Huang G.H., Lin Y.P. y He L. (2009). A Two-Step Infinite α -Cuts Fuzzy Linear Programming Method in Determination of Optimal Allocation Strategies in Agricultural Irrigation Systems. *Water Resources Management* 23(11): 2249-2269.
- Luján J. (1992). Eficiencia de Riego. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid.
- MAGRAMA (2010). Análisis de la economía de los sistemas de producción. Resultados técnico-económicos de explotaciones agrícolas de Andalucía en 2009. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.
- MAGRAMA (2012). Plan Nacional de Regadíos. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid. URL: <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/gestion-sostenible-de-regadios/plan-nacional-de-regadios/texto-completo/default.aspx> (visitado por última vez el 30/03/2014).
- Mamitim Y., Feike T., Seifert I. y Doluschitz R. (2014). Irrigation in the Tarim Basin, China: farmers' response to changes in water pricing practices. *Environmental Earth Sciences*. Published online 16 April 2014.
- MARM (2008). Sistema para la identificación y caracterización de medidas de planificación hidrológica para un análisis coste-eficacia. Documento de trabajo. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, Madrid.
- MARM (2010). Informe de viabilidad del Proyecto de modernización zona regable del Genil Margen Izquierda 2ª Fase T.M. de Palma del Río (Córdoba). Clave CO-3116. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. En http://www.magrama.gob.es/es/agua/planes-y-estrategias/informes-de-viabilidad-de-obras-hidraulicas/reggenilf_tcm7-27292.pdf (visitado por última vez el 27/05/2014).
- Martin P., Williams J. y Stone C. (2008). Transaction costs and water reform: the devils hiding in the details. Cooperative Research Centre for Irrigation Futures. Technical Report No. 08/08.
- Martínez Y. y Gómez-Limón J.A. (2004), Simulación multicriterio de mercados de agua de regadío: el caso de la cuenca del Duero. *Estudios Agrosociales y Pesqueros* nº 202: 101-134.
- Massarutto A. (2003). Water pricing and irrigation water demand: efficiency vs. sustainability. *European Environment* 13: 100-119.
- Mateos L., Lozano D., Baghil A.B.O., Diallo O.A., Gómez-Macpherson H., Comas J. y Connor D. (2010). Irrigation performance before and after rehabilitation of a representative, small irrigation scheme besides the Senegal River, Mauritania. *Agricultural Water Management* 97(6): 901–909.
- Mathur V.K. (1991). How Well Do We Know Pareto Optimality? *Journal of Economic Education* 22(2): 172–178.

- McCann L. e Easter W.K. (2004). A framework for estimating the transaction costs of alternative mechanisms for water exchange and allocation. *Water Resources Research* 40, W09S09.
- Mehta L. (2005a). The Politics and Poetics of Water: Naturalising Scarcity in Western India. Orient Longman, Nueva Deli.
- Mehta L. (2005b). Scarcity and the politics of allocation: An ESRC ‘Science in Society Programme’ funded workshop held at the Institute of Development Studies on 6–7 June 2005. Workshop Report. Institute of Development Studies, Brighton.
- Mejías P., Varela-Ortega C. y Flichman G. (2004). Integrating agricultural policies and water policies under water supply and climate uncertainty. *Water Resources Research* 40, W07S03.
- Mesa-Jurado M.A., Berbel J. y Orgaz F. (2010). Estimating marginal value of water for irrigated olive grove with the production function method. *Spanish Journal of Agricultural Research* 8(S2), 197-206.
- MIMAM (2000). Análisis Económicos. Documento anexo al Plan Hidrológico Nacional. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- MIMAM (2007). El agua en la economía española: Situación y perspectivas. Informe integrado del análisis económico de los usos del agua en España. Artículo 5 y Anejo III de la Directiva Marco de Agua. Ministerio de Medio Ambiente (2007), Madrid.
- MMA (2000). Documentación técnica del Plan Hidrológico Nacional. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- MMA (2003). Programa A.G.U.A. Actuaciones para la Gestión y la Utilización del Agua. Ministerio de Medio Ambiente. En http://servicios.laverdad.es/servicios/especiales/phn/documentos/programa_agua.pdf (visitado por última vez el 6/05/2014).
- MMA (2007). Precios y Costes de los Servicios de Agua. Informe integrado de recuperación de costes de los servicios de agua en España. Artículo 5 y anejo III de la Directiva Marco de Agua. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- MMA (2008). Sistema de identificación y caracterización de medidas para el análisis coste-eficacia (SICMACE). Documentos de trabajo. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Molle F. (2009). Water scarcity, prices and quotas: a review of evidence on irrigation volumetric pricing. *Irrigation and Drainage Systems*, 23: 43–58.
- Molle F. y Berkoff J. (2006), Cities versus Agriculture: Revisiting intersectoral water transfers, potential gains and conflicts. Comprehensive assessment of water management in agriculture. Research Report 10, IWMI.
- Molle F., Venot J.P. y Hassan Y. (2008). Irrigation in the Jordan Valley: are water pricing policies overly optimistic? *Agricultural Water Management* 95(4), 427-438.
- Montero J. y Tarjuelo J.M. (2004). Analysis of water application cost with permanent set sprinkler irrigation systems. *Irrigation Science* 23: 103–110.
- Montginoul M. y Rieu T. (2001). Implementation issues related to different water pricing reforms: application to the Charente river Basin in France and irrigation management agencies in Morocco. Conference ‘Pricing water. Economics, Environment and Society’. Sintra (Italia), 6-7 de Septiembre de 1999.

- Moriana A., Orgaz F., Pastor M. y Fereres E. (2003). Yield response of mature olive grove to water deficit. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 123(3), 425-431.
- Movik S. (2011). Allocation discourses: South African water rights reform. *Water Policy* 13(2): 161-177.
- Navarro M., Martín R. y Castillo F.J. (2007). Estudio del rendimiento económico de la actividad por m³ de agua empleada en función del coste. IV Congreso Nacional y I Congreso Ibérico de Agroingeniería. Albacete, 3-5 Septiembre de 2007.
- OCDE (2008). Environmental Performance of Agriculture in OECD countries since 1990. OCDE, París. URL: www.oecd.org/tad/env/indicators (visitado por última vez el 30/10/2013).
- OCDE (2009). Managing Water for All: An OECD Perspective on Pricing and Financing. OECD Publishing, Paris.
- OCDE (2010). OECD Economic Surveys: Spain. OECD Publishing, Paris.
- OCDE-FAO (2008). Agricultural outlook 2008-2017. Highlights. París. 73 pp.
- Olona J. y Horta M.A. (2010). Evaluación de la política de precios del agua de riego. Evidencias empíricas en Navarra. *Estudios Agrosociales y Pesqueros* 227: 11-47.
- Ortega J.F., de Juan J.A., Martín-Benito J.M. y López-Mata E. (2004). MOPECO: An economic optimization model for irrigation water management. *Irrigation Science* 23(2): 61-75.
- Pearce D.W. y Turner R.K. (1995). Economía de los recursos naturales y del medio ambiente. Colegio de Economistas de Madrid-Celeste Eds. Madrid.
- Perry C., Steduto P., Allen R.G. y Burt C.M. (2009). Increasing productivity in irrigated agriculture: agronomic constraints and hydrological realities. *Agricultural Water Management* 96: 1517-1524.
- Peterson J.M. y Ding Y. (2005). Economic adjustments to groundwater depletion in the high plains: Do water-saving irrigation systems save water? *American Journal of Agricultural Economics* 87:147-159.
- Pfeiffer L. y Lin C.-Y.C. (2012). Groundwater pumping and spatial externalities in agriculture. *Journal of Environmental Economics and Management* 64(1): 16-30.
- Pike T. (2005). Agricultural water conservation program review. Internal Report South East Kelowna Irrigation District. Kelowna, Canadá.
- Plan Especial del Alto Guadiana (2003). Definición de escenarios de uso del agua en la agricultura del Acuífero 23. En: <http://www.chguadiana.es/corps/chguadiana/data/resources/file/PEAG>.
- Planas I. (2005). Principales mecanismos de evaluación económica de políticas públicas. *Ekonomiaz: Revista vasca de economía* 60(1): 98-121.
- Playán E., Slatni A., Castillo R. y Faci J.M. (2000). A case study for irrigation modernisation: II. Scenario Analysis. *Agricultural Water Management* 42: 335-354.
- Playán E. y Mateos L. (2006). Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural Water Management* 80: 100-116.
- Plusquellec H. (2009). Modernization of large-scale irrigation systems: is it an achievable objective or a lost cause? *Irrigation and Drainage* 58: 104-120.

- Poddar R, Qureshi M.E. y Shi T. (2014). A Comparison of Water Policies for Sustainable Irrigation Management: The Case of India and Australia. *Water Resources Management* 28(4): 1079-1094.
- Pujol J., Berbel J., Ramírez F., Viaggi D. y Raggi M. (2006). Evaluation of markets for irrigation water in the internal river basins of Catalonia, Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research* 4(1): 3-16.
- Reca J., Roldan J., Alcaide M., Lopez R. y Camacho E. (2001). Optimisation model for water allocation in deficit irrigation systems, I. Description of the model. *Agricultural Water Management* 48: 103-116.
- Rico M. y Gómez-Limón J.A. (2005). Los mercados de agua: análisis de los condicionantes para su correcto desarrollo en España. *Estudios Agrosociales y Pesqueros* 206:33-62.
- Riegos de Navarra (2009). Impacto de la política de precios del agua en las zonas regables de Navarra y su influencia en la renta y el empleo agrario como consecuencia de la aplicación de la Directiva Marco 2000/60/CE. En: <http://www.riegosdenavarra.com/publica/publicaciones.htm> <http://ssrn.com/abstract=1928367> o <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.resource.050708.144256>.
- Riesgo L. y Gómez-Limón J.A. (2002). Políticas de tarificación y de ahorro de agua en el regadío. Análisis de su aplicación conjunta. *Estudios Agrosociales y Pesqueros* 197: 63-104.
- Rieu T. (2005). Water pricing for agriculture between cost recovery and water conservation: Where do we stand in France? OECD Workshop on Agriculture and Water: Sustainability, Markets and Policies. Adelaide (Australia). 14-18 de Noviembre de 2005.
- Rodríguez Díaz J.A. (2003). Estudio de la gestión del agua de riego y aplicación de las técnicas de benchmarking a las zonas regables de Andalucía. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba.
- Rodríguez Díaz J.A., Camacho E., López R. y Pérez L. (2008). Benchmarking and multivariate data analysis techniques for improving the efficiency of irrigation districts: an application in Spain. *Agricultural Systems* Vol 96: 250-259.
- Rodríguez Díaz J.A., Camacho E. y Blanco M. (2011). Evaluation of water and energy use in pressurized irrigation networks in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 137(10): 644-650.
- Rodríguez Díaz J.A., Pérez L., Camacho E. y Montesinos P. (2012). The Paradox of irrigation scheme modernization: more efficient water use linked to higher irrigation demand. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9(4): 1000-1008.
- Rodríguez Ferrero N., Sánchez M.T. y López Martos J. (2008). Un análisis de la eficiencia socioeconómica del agua en el regadío andaluz. *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros* 217: 183-208.
- Rodríguez Ferrero N., Salas M. y Sánchez M.T. (2010). Assessment of productive efficiency in irrigated areas of Andalusia. *International Journal of Water Resources Development* 26(3): 365-379.
- Rogers D.H., Lamm F.R., Alam M., Trooien T.P., Clark G.A., Barnes P.L. y Mankin K. (1997). Efficiencies and water losses of irrigation systems. MF-2243. Mayo de 1997. Kansas State University, Research and Extension.
- Rogers P., De Silva R. y Bhatia R. (2002). Water is an economic good: How to use prices to promote equity, efficiency, and sustainability. *Water Policy* 4: 1-17.

- Sadegh M. y Kerachian R. (2011). Water Resources Allocation Using Solution Concepts of Fuzzy Cooperative Games : Fuzzy Least Core and Fuzzy Weak Least Core. *Water Resources Management* 25: 2543–2573.
- Safa H.H., Morid S. y Moghaddasi M. (2012). Incorporating Economy and Long-term Inflow Forecasting Uncertainty into Decision-making for Agricultural Water Allocation during Droughts. *Water Resources Management* 26(8): 2267-2281.
- Saliba B.C. (1987), Do water markets 'work'? Market transfers and trade-offs in the Southwestern states, *Water Resources Research* July, No. 7.
- Saliba B.C. y Bush D.B. (1987), Water markets in theory and practice: market transfers, water values, and public policy. *Studies in Water Policy and Management* No. 12. Westview Press, Inc., Boulder, Colorado.
- Saliba B.C., Bush D.B., Martin W.E. y Brown T.C. (1987). Do water market prices appropriately measure water values? *Natural Resources Journal*, Summer, No. 3.
- Sampath R.K. (1992). Issues in Irrigation Pricing in Developing Countries. *World Development* 20: 967-977
- Scherer T. y Weigel J. (1993). Planning to irrigate... A checklist. NDSU Extension Service, 1993. North Dakota State University, EE UU.
- Schierling S.M., Young R.A. y Cardon G.E. (2006). Public subsidies for water-conserving irrigation investments: Hydrologic, agronomic, and economic assessment. *Water Resources Research* 42(3): W03428.
- Schoengold K., Sunding D.L. y Moreno G. (2006). Price elasticity reconsidered: Panel estimation of an agricultural water demand function. *Water Resources Research* 42, W09411.
- Schuck E.C. y Green G.P. (2001). Field attributes, water pricing, and irrigation technology adoption. *Journal of Soil and Water Conservation* 56: 293-298.
- Seagraves J.A., Easter K.W. (1983). Pricing Irrigation Water in Developing Countries. *Water Resources Bulletin* 19(4): 663-672.
- Sechi G.M., Zucca R. y Zuddas P. (2013). Water Costs Allocation in Complex Systems Using a Cooperative Game Theory Approach. *Water Resources Management* 27(6): 1781-1796.
- Semaan J., Flichman G., Scardigno A. y Steduto P. (2007). Analysis of nitrate pollution control policies in the irrigated agriculture of Apulia Region (Southern Italy): A bio-economic modelling approach. *Agricultural Systems* 94: 357–367.
- Shangguan Z., Shao M., Horton R., Lei T., Qin L. y Ma J. (2002). A model for regional optimal allocation of irrigation water resources under deficit irrigation and its applications. *Agricultural Water Management* 52: 139-154.
- Smout K. y Gorantiwar S.D. (2006). Productivity and equity of different irrigation schedules under limited water supply. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 132(4): 349-358.
- Socratous G. (2011). Water Pricing Policy in Cyprus: The Implications of the Water Framework Directive. Water Resources Allocation. Policy and Socioeconomic Issues in Cyprus. *Global Issues in Water Policy* 1: 125-139.

- Spulber N. y Sabbaghi A. (1998). *Economics of Water Resources: from Regulation to Privatization*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Strosser P., Roussard J. y Grandmougin B. (2007). EU Water saving potential II, final report (ENV.D.2/ETU/2007/0001r). Ecologic - Institute for International and European Environmental Policy, Berlín.
- Sunding D., Zilberman D., Howitt R., Dinar A. y MacDougall N. (1997). Modelling the impacts of reducing agricultural water supplies: Lessons from California's Bay/Delta problem. En D. Parker y J. Tsur (eds): *Decentralization and coordination of water resource management*. Nueva York: Kluwer.
- SWSI (2004). Colorado Water Conservation Board. Statewide Water Supply Initiative. Department of Natural Resources. Colorado (EE UU).
- Syme G.J. y Nancarrow B.E. (1997). The determinants of perceptions of fairness in the allocation of water to multiple uses. *Water Resources Research* 33(9): 2143-2152.
- Takahashia T., Aizakib H., Gec Y., Mac M., Nakashimaa Y., Satoa T., Wangc W. y Yamadad N. (2013). Agricultural water trade under farmland fragmentation: A simulation analysis of an irrigation district in northwestern China. *Agricultural Water Management* 122: 63–66.
- Tedeschi A., Beltrán A. y Aragüés R. (2001). Irrigation management and hydrosalinity balance in a semi-arid area of the middle Ebro river basin (Spain). *Agricultural Water Management* 49(1): 31-50.
- Thobani M. (1997). Formal Water Markets: Why, when, and how to Introduce Tradable Water Rights. *The World Bank Research Observer* 12 (2): 161-179.
- Tirado D., Gómez C.M. y Lozano J. (2006). Efficiency improvements and water policy in the Balearic Islands: A general equilibrium approach. *Investigaciones Económicas* Vol. XXX(3): 441- 463.
- Torres, M. (2004). Avances técnicos en la desalación de aguas. Revista Ambienta, Octubre 2004. Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino, Madrid.
- Tsur Y. (2005). Economic aspects of irrigation water pricing. *Canadian Water Resources Journal* 30(1): 31–46.
- Tsur Y. (2009). On the economics of water allocation and pricing, *Annual Review of Resource Economics* 1(1): 513-536.
- Tsur Y. y Dinar A. (1995). Efficiency and equity considerations in pricing and allocating irrigation water. Policy Research Working Paper 1460. The World Bank, Washington, DC. 40 pp.
- Tsur Y. y Dinar A. (1997). On the relative efficiency of alternative methods for pricing irrigation water and their implementation. *World Bank Economic Review* 11: 243-262.
- Turner K., Georgiou S., Clark R., Brower R. y Burke J. (2004). Economic valuation of water resources in agriculture. From the sectoral to a functional perspective of natural resource management. *FAO Water Reports* No. 27. FAO, Rome, Italy.
- Turton A. (2013). Fluid rights: Water allocation reform in South Africa. Synne Movik. Publisher: HSRC Press, Cape Town, South Africa, 2012, paperback, 191 pages. ISBN: 978-0-7969-2353-0. *Water Policy* 15(1): 176-177.

- UE (2004). Information Sheet on Assessment of the Recovery of Costs for Water Services for the 2004 River Basin Characterisation Report (Version 7, 21 de Enero de 2004). Unión Europea, Bruselas.
- Wang S. y Huang G.H. (2012). Identifying Optimal Water Resources Allocation Strategies through an Interactive Multi-Stage Stochastic Fuzzy Programming Approach. *Water Resources Management* 26: 2015–2038.
- Ward F.A. y Pulido-Velázquez M. (2008). Water conservation in irrigation can increase water use. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(47): 18215–18220.
- Wichelns D. (1999). Economic Efficiency and Irrigation Water Policy with an example from Egypt. *Int J Water Resour Dev* 15: 543–560.
- Wichelns D., Houston L. y Cone D. (1996). Economic Incentives Reduce Irrigation Deliveries and Drain Water Volume. *Irrigation and Drainage Systems* 10: 131–141.
- Young R.A. (2005). Determining the economic value of water. Concepts and methods. DC. Resources for the Future. Washington DC. 356 pp.
- Zanou, B., Kontogianni, A. y Skourtos, M. (2003). A classification approach of cost effective management measures for the improvement of watershed quality. *Ocean Coast Manage*, 46: 957–983.